



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ v BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

# **TESTOVÁNÍ VENTILAČNÍCH VYÚSTEK PRO KABINU OSOBNÍHO VOZU**

TESTING OF VENTILATION OUTLETS FOR a PASSENGER CAR CABIN

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Martin Dohnal**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.**

**BRNO 2016**



## Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	<b>Martin Dohnal</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Testování ventilačních výústek pro kabinu osobního vozu

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Prostředí v kabině vozidla ovlivňuje komfort pasažérů a souvisí také s aktivní bezpečností provozu. Předpokladem správné funkce ventilačního systému v kabině vozidla je optimalizovaná konstrukce větracích výústek.

Pro hodnocení proudění vzduchu z modelové výústky bude použita vizualizace proudu pomocí tzv. kouřové metody, kdy je zviditelněný proud vzduchu z výústky osvětlen vhodným světelným zdrojem a jeho obraz zaznamenán pomocí kamery nebo fotoaparátu. Získaný 2D obraz proudění je pak analyzován s cílem získat informace o směru proudění a geometrii proudu. Práce bude zaměřena na několik variant výústek a bude studován vliv polohy směrovacích lamel na parametry proudu.

#### Cíle bakalářské práce:

Rešerše prací věnovaných vizualizaci proudění z výústek, seznámení se s použitou metodou  
Provedení experimentu vizualizace proudu z výústky pomocí tzv. kouřové metody a laserového nože pro několik variant výústek  
rešerše a návrhy pro optimalizaci konstrukce větracích výústek.  
Zhodnocení výsledků o směru proudění a geometrii proudu pro sledované varianty výústek.

#### Seznam literatury:

CALETKA, P. Hodnocení funkčnosti větrací výústky pro kabinu osobního vozu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 66 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

PAVELEK, M., JANOTKOVÁ, E., ŠTĚTINA, J. Vizualizační a optické měřicí metody [online]. 2. [Brno]: Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, 2007 [citováno 25.3. 2014]. Dostupné z: <<http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0000.htm>>.

JANOTKOVÁ, E. TECHNIKA PROSTŘEDÍ - 1. část [online]. 2011 [citováno 28.5.2014]. Dostupné z: <[http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/file/110\\_1\\_1/](http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/file/110_1_1/)>.

CHYSKÝ, Jaroslav; HEMZAL, Karel, a kol. Větrání a klimatizace : Technický průvodce. 3. přeprac. vyd. Praha: Bolit - B press Brno, 1993. 560 s. ISBN 80-901574-0-8.

DALY, Steven. Automotive Air Conditioning and Climate Control Systems. [s.l.]: Butterworth-Heinemann, 2006. 432 s. ISBN 0-7506-6955-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 1. 12. 2015



doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan



## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá experimentálním testováním ventilačních vyústek kabiny osobního vozu. V úvodní části jsou obecně charakterizovány vlastnosti proudění vzduchu a vlastnosti proudu vzduchu vycházejícího z vyústky. Následující část popisuje funkce a dopady ventilačního systému. Další část práce je věnována přehledu způsobů testování ventilačních vyústek. Dále je proveden průzkum použití vyústek v segmentu osobních vozů střední třídy. Stěžejní díl práce poté tvoří popis experimentu, jeho provedení pomocí vizualizace kouřem a použití laserového nože a vyhodnocení jeho výsledků.

## **Klíčová slova**

Experimentální testování, vyústka, vizualizace proudění, proudění vzduchu

## **Abstract**

This thesis deals with experimental testing of car cabin ventilation outlets. In first part the main characteristics of air flowing are made and applied on stream from outlet. Next part deals with function and impact of car cabin ventilation system. Another part is dedicated to overview of commonly used method of outlet testing. Research of usage of different type of outlets in mid-class cars was made. The main part of this thesis is done in final part where the testing is described by the smoke visualisation with use of laser knife and evaluation of results is performed.

## **Keywords**

Experimental testing, air outlet, flow vizualization, air flowing

## **Bibliografická citace**

DOHNAL, M. Testování ventilačních výústek pro kabinu osobního vozu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 54 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D..

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Testování ventilačních vyústek pro kabinu osobního vozu* vypracoval pod vedením doc. Ing. Jana Jedelského Ph.D., že jsem uvedl všechny literární prameny, odbornou literaturu a webové stránky, ze kterých jsem čerpal.

V Brně dne 27. května 2016

.....

Martin Dohnal



## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce, doc. Ing. Janu Jedelskému Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při vedení této práce. Dále děkuji Bc. Petru Caletkovi za velkou pomoc a rady při seznamování se s metodami práce v laboratoři a pomoc se směřováním mé práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat i mé rodině a přítelkyni za podporu během studia.

Práce vznikla za podpory projektu „Centrum kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka TE01020020“ a projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“.

This work was created with the support of the project TE01020020 Josef Bozek Competence Centre for Automotive Industry and LO1202 NETME CENTRE PLUS funded by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic under the National Sustainability Programme I.



## Obsah

Úvod.....	13
1 Úvod do proudění z vyústky.....	14
1.1 Teorie proudění.....	14
1.2 Rozdělení proudění.....	14
1.3 Charakterizace proudění z vyústky .....	15
1.3.1 Rozhodnutí o turbulentnosti.....	15
1.3.2 Rozhodnutí o neizotermičnosti.....	15
1.3.3 Rozhodnutí o volnosti proudu a vlivu prostředí.....	16
2 Funkce a vliv ventilačního systému.....	17
2.1 Součásti ventilačního systému.....	17
2.2 Funkce ventilačního systému .....	17
2.2.1 Regulace oxidu uhličitého.....	18
2.2.2 Regulace vlhkosti vzduchu a odmlžení skel.....	18
2.2.3 Rozmrazování skel.....	18
2.2.4 Nepřímá výměna vzduchu.....	19
2.2.5 Tepelný komfort.....	19
3 Testování vyústek.....	20
3.1 Vliv tvaru vyústky .....	20
3.2 Vliv počtu vyústek na kvalitu větrání.....	21
3.3 Experimentální testování směřování vyústek.....	21
3.3.1 Vliv kolene na měřicí trati .....	22
3.4 Využití moderních metod při testování.....	23
3.5 CFD simulace proudění z vyústek .....	24
3.5.1 Studie dynamického větrání pomocí CFD modelu.....	25
4 Použití vyústek v osobních automobilech napříč střední třídou .....	26
4.1 Nižší střední třída .....	27
4.2 Střední třída .....	29
4.3 Vyšší střední třída .....	31
5 Metody použité během experimentu .....	32
5.1 Metoda vizualizace .....	32

5.2	Způsob zviditelnění proudu .....	33
5.3	Způsob prosvětlení .....	33
5.4	Způsob zaznamenávání obrazových dat.....	34
5.5	Geometrie použitých zařízení.....	35
5.6	Způsob zaznamenání ostatních dat.....	35
5.7	Vyhodnocení obrazového materiálu.....	35
6	Popis Experimentu .....	36
6.1	Výroba vyústek.....	36
6.2	Testované varianty vyústek.....	36
6.3	Příprava experimentu .....	37
6.3.1	Příprava měření z boku .....	37
6.3.2	Příprava měření zespodu.....	38
6.4	Provedení experimentu.....	39
7	Vyhodnocení experimentu .....	40
7.1	Zpracování obrazových dat.....	40
7.2	Kritérium pro porovnání.....	40
7.3	Vyhodnocená data.....	42
7.4	Závislosti směřování na počtu lamel.....	45
7.4.1	Zvyšující se počet horizontálních lamel u variant xHyV .....	45
7.4.2	Zvyšující se počet horizontálních lamel u variant xVyH .....	45
7.4.3	Grafy s výsledky.....	46
8	Možné metody optimalizace.....	48
8.1	Změna tvaru.....	48
8.2	Profil lamel .....	48
8.3	Poměr stran vyústky .....	48
8.4	Zvětšení aktivní plochy .....	48
	Závěr .....	49
	Použité zdroje .....	50
	Seznam použitých symbolů .....	54

## Úvod

Větrací systém v automobilu se stará o distribuci vzduchu, vytápění a klimatizování kabiny osobního vozu. Všechny tyto jevy jsou zprostředkovány vyústkami, pomocí kterých větrací systém velkou měrou ovlivňuje podmínky a komfort v osobních automobilech. Pokud jsou zajištěny příjemné podmínky a dostatečný tepelný komfort pro řidiče a spolujezdce, přispívá to ke zlepšení koncentrace posádky, a tím i bezpečnosti provozu na silnici.

Jedním z hlavních aspektů posouzení funkčnosti těchto větracích vyústek je jejich směřování do prostoru kabiny vozu. Tato práce se tedy zabývá analýzou směřování těchto ventilačních vyústek, s měřením doplňkových informací o průtoku a tlakové ztrátě konkrétních variant vyústek.

Cílem této práce je doplnění výsledků měření provedených v paralelně vznikající diplomové práci o nové varianty vyústek, což povede k možnosti hlubšího pochopení závislosti počtu a polohy lamel na kvalitě směřování proudu vzduchu. Proto byly vytvořeny nové 3D modely bočních stěn vyústek a nastavovacích bočnic pro čtyři lamely, které byly následně vytištěny na 3D tiskárně.

Měření poté probíhalo v laboratorní komoře, kde se nachází měřicí trať určená na testování ventilačních vyústek. Experiment byl proveden metodou vizualizace kouřem, který byl následně protnut laserovým nožem, který ho zviditelnil v tmavém prostředí laboratoře. Oblast proudového pole mohla být tedy zaznamenána fotograficky. Vše za běhu záznamového řetězce doplňkových veličin.

Následně byla obrazová data vyhodnocena v rámci paralelně probíhající bakalářské práce. Na základě těchto vyhodnocení byly doplněny směrnice stávajících dat a zhodnocen vliv počtu lamel na úhlu směřování proudu.

Jedním z cílů této práce je uvedení návrhů na optimalizaci konstrukce ventilační vyústky. Na základě získaných výsledků můžeme rozhodnout, které postavení lamel se ukazuje jako vhodnější řešení. Jsou stanoveny také závislosti, jak se vyvíjí směřování proudu při změně počtu lamel.

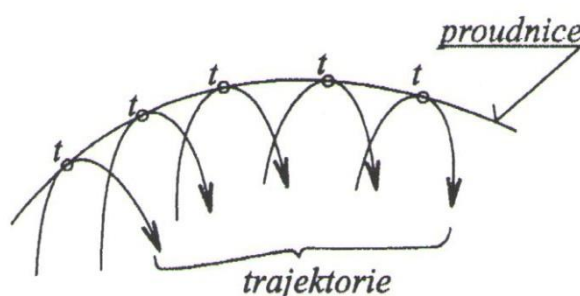
Na směřování proudu může mít vliv mimo jiné také tvar vyústky, profil lamel a postavení obou řad lamel vůči sobě, což se ukázalo při experimentálních měření a numerických simulacích provedených na toto téma.

# 1 Úvod do proudění z vyústky

Pro objasnění chování proudu vzduchu, vystupujícího z ventilační vyústky osobních vozů, je třeba se seznámit s teoretickými vlastnostmi a rozdělením proudění. Dále je třeba určit charakter proudění vzduchu, týkající se měřených vyústek, přičemž v některých svých částech se bude tato práce opírat o základy již provedených výpočtů v bakalářské práci Petra Caletky.

## 1.1 Teorie proudění

Proudění je pohybem tekutiny, při které dochází k pohybu částic po určitých drahách (trajektorie). Dráha těchto částic je v ustáleném proudění totožná s proudnicí, tedy křivkou, podle jejíž tečny lze určit směr proudění v konkrétním okamžiku. V neustáleném proudě lze proudnici znázornit jako obalovou křivku více drah částic. [1, 2]



Obrázek 1 - Proudnice tvořící obalovou křivku trajektorií [1]

## 1.2 Rozdělení proudění

Proudění můžeme dělit dle mnoha nejrůznějších hledisek.

Dle stlačitelnosti na stlačitelná proudění dosahující rychlosti pohybující se kolem a přes rychlost zvuku a nestlačitelné prostředí, kde mluvíme o rychlostech dostatečně menších než rychlost zvuku. [1]

Podle ustálenosti na ustálená, tedy neměnná s časem (stacionární) a neustálená, která jsou závislé na čase (nestacionární). [1, 2]

Podle fyzikálních vlastností tekutin hovoříme o ideálních a reálných tekutinách. [1, 2]

U ideálních kapalin se hovoří o nevířivém proudění, kde se koná pouze translační pohyb, bez rotací kolem vlastních středů a o vířivém proudění, ve kterém se kromě translačních pohybů částice otáčejí i okolo vlastních středů, nedochází však k vibracím. [1, 2]

U reálných kapalin popisujeme Laminární proudění, kde pohyb částic probíhá ve vrstvách, nikoliv po průřezu a hybnost se přenáší hlavně molekulami a turbulentní proudění, kde mají částice vedle podélné složky rychlosti i složku turbulentní (flukтуаční) a hybnost se přenáší celými molárními částicemi, které tvoří nahodilé turbulentní víry. [1, 2]

Podle geometrického uspořádání na proudění třírozměrná (prostorová) -  $v = v(x, y, z)$ , proudění dvourozměrná (rovinná) -  $v = v(x, y)$  a proudění jednorozměrná -  $v = v(x)$ . [2]

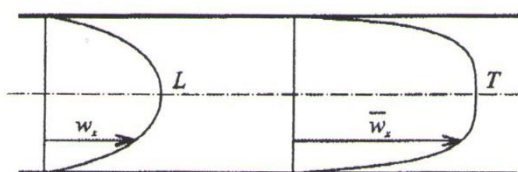
## 1.3 Charakterizace proudění z vyústky

### 1.3.1 Rozhodnutí o turbulentnosti

Pro určení a zařazení proudění v laboratorní měřicí trati je nejprve nutno určit si Reynoldsovo číslo. Typ proudění je závislý na střední rychlosti v průřezu  $w$ , charakteristickém rozměru potrubí  $D$  a na kinematické vazkosti  $\nu$ . Tyto tři veličiny tedy dohromady tvoří Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{w \cdot D}{\nu} [-]$$

Pokud je toto číslo  $Re \leq 2320$ , proudění je proudění v trubici laminární. V tomto stavu se turbulentní proudění, dokonce v případě jeho umělého vytvoření není schopno udržet, protože třecí síly převládají nad těmi setrvačnými. Při  $Re = 2320$  hovoříme o tzv. kritickém Reynoldsově čísle  $Re_{kr}$ , při kterém se proud vzduchu pohybuje kritickou rychlostí  $w_{kr}$  a při  $Re_{kr} < Re < 10^5$  se proud nachází v tzv. přechodové oblasti, kdy může být jak laminární, tak turbulentní, nebo střídavý. Nad touto hodnotou je proud zaručeně turbulentní, přičemž setrvačné síly převyšují třecí. [1]



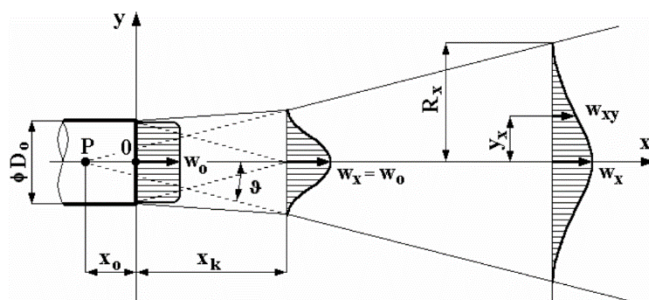
Obrázek 2 - Rychlostní profil laminárního proudění zaujímající tvar paraboly (vlevo) a rychlostní profil proudění turbulentního (vpravo)[1]

Reynoldsovo číslo pro laboratorní trať bylo stanoveno již v bakalářské práci Petra Caletky. Pro průtok  $33,5 \text{ m}^3/\text{hod}$  byla vypočtena hodnota 10327. Tato hodnota tedy převyšovala hranici Reynoldsova čísla, za kterou se proudění považuje za zcela turbulentní.[3]

Tento výpočet byl pouhým ověřením skutečnosti, že proud vzduchu vycházející z vyústky do větraného prostoru je ve většině případů turbulentní. [4]

### 1.3.2 Rozhodnutí o neizotermičnosti

Základem pro popis proudění z vyústky je volný izotermní proud. Takovýto proud vzduchu o shodné teplotě s okolím vystupuje vyústkou o kruhovém průřezu a schéma proudu je na obrázku 3. [4]



Obrázek 3 - Schéma volného izotermního proudu z kruhové vyústky [4]

V případě tohoto experimentu sice máme vyústku o obdélníkovém průřezu, avšak po krátkém úseku, na kterém můžeme zaznamenat tvar proudu shodný s tvarem vyústky, se průřez stává vždy kruhovým. V prostoru se tedy vyváří postupně se rozšiřující kuželovitý proud kruhového průřezu. [4]

Dalším důležitým aspektem proudění je tedy rozhodnutí o jeho neizotermičnosti, prováděného skrz výpočet Archimedova čísla. Tento výpočet byl pro laboratorní trať také proveden v bakalářské práci P. Caletky. Výsledek, tedy  $A_r = 1,2 \cdot 10^{-3}$  nijak výrazně nepřekračuje hranici  $A_{r0} \leq 0,001$  a můžeme tedy říct, že se jedná o mírně neizotermní proud, od čehož se ale pro zjednodušení problému upustilo, a proud tedy považujeme za izotermní. Silně neizotermní podmínky nastanou, pokud  $A_{r0} > 0,1$ . [3]

### **1.3.3 Rozhodnutí o volnosti proudu a vlivu prostředí**

Pokud přiváděný proud není omezen žádnými stěnami a předměty, hovoříme o proudu volném. Pokud zde hraje svou roli ovlivnění stěnami a předměty, jedná se o proudění omezené. [4]

V případě sledované oblasti proudění z vyústky jde, přesto, že interiér automobilu je členité prostředí, o proudění volné, kvůli velikosti této oblasti, která je vzdálena maximálně jeden metr od vyústky. Proto při experimentu není vliv stěny nijak simulován. Dále můžeme říci, že v testovací laboratoři má prostředí stejné fyzikální vlastnosti jako proud, a můžeme ho označit jako klidné. Proud v takovémto prostředí se nazývá zatopený. [4, 3]



## 2 Funkce a vliv ventilačního systému

Úplně první zmínka o větrání v kabině vozidel je z roku 1904, kde B. Dudley píše o velké důležitosti odvětrávání kabin hromadné dopravy, kvůli obsahu oxidu uhličitého a zápachů v atmosféře těchto dopravních prostředků. Mluví se zde o nutnosti přivést necelých  $20\text{ m}^3$  na osobu na hodinu. [5]

Tento článek by se dal považovat za prapůvodce všech dnešních studií, zabývajících se větráním a klimatizací v osobních automobilech a v dnešní době je větrání zásadní součástí všech dopravních prostředků a stává se standardem i dnešních moderních budov.

### 2.1 Součásti ventilačního systému

Klimatizace a větrání je v osobních automobilech zprostředkováno sérií ventilačních vyústek. Zpravidla se jedná o čtyři nastavitelné vyústky na palubní desce, vyústku pod čelním sklem, dvě pevné vyústky nastavené na ofukování bočních skel vepředu, umístěné buď v palubní desce, nebo jsou vyvedeny ze dveří, vyústky pod palubní deskou pro ofukování nohou cestujících vepředu, vyústky pod sedadly směřující na cestující vzadu a v některých automobilech ještě dvě nastavitelné vyústky umístěné na konci středového tunelu, určené pro ofukování pasažérů vzadu. Schéma rozvodu vzduchu je na obrázku 4.



Obrázek 4 - Schéma komponent rozvodu vzduchu v interiéru Škody Octavia II [6]

Tato práce je věnována experimentálnímu měření funkčnosti výustky, umístěné na pravé straně palubní desky, určené pro spolujezdce.

### 2.2 Funkce ventilačního systému

Větrání, topení a klimatizování v automobilech nemá jen funkci regulace teploty. Stará se také o bezpečí pasažérů snižováním únavy, zajištěním dobré viditelnosti a dostatečného pohodlí. Souvislý proud také snižuje úroveň oxidu uhličitého, odvádí vodní páry, stará se o odmlžení, odmražení skel a prevenci zápachů. [7]. Dále je nutná regulace teploty vstupujícího vzduchu, která má za cíl dosažení ideální teploty prostředí, přičemž bude dosaženo nejlepšího možného tepelného komfortu.

### 2.2.1 Regulace oxidu uhličitého

Velmi důležitá je regulace oxidu uhličitého, zvláště při přítomnosti více lidí v kabině. Nadměrná koncentrace totiž způsobuje únavu a ztrátu koncentrace, což je při řízení velmi negativní vliv. Ve vysokých koncentracích může také způsobovat malátnost, nevolnost a dýchací potíže [8]. Dle výzkumu je velmi důležité také nastavení intenzity proudění z vyústek a pro snížení úrovně  $\text{CO}_2$ , přičemž je nutné větší nastavení cirkulace vzduchu, než na stupěň 1 a 2, při kterém hladiny oxidu uhličitého dosahují dokonce vyšších hodnot, než při vypnuté cirkulaci. Po zapnutí na úroveň 4 došlo po ustálení k návratu na hodnoty, které odpovídaly venkovním koncentracím. [9]

### 2.2.2 Regulace vlhkosti vzduchu a odmlžení skel

Velmi důležitou funkcí je také odvod vodních par, který se děje skrze výparník, přes který prochází vzduch uvnitř jednotky HVAC<sup>1</sup>. V průběhu ochlazování vzduchu způsobí, že na něm kondenzuje přebytečné množství vodní páry a tím se tedy vzduch vysušuje. Relativní vlhkost, při zachování určité míry komfortu posádky, se pohybuje okolo 60%.

Funkce odmlžení skel je zvláště důležitá v chladných dnech, kdy nastane velký rozdíl vnitřní a vnější teploty a voda začne kondenzovat na sklech.

Na rychlost odmlžení skel má mimo jiné vliv i geometrie vyústky a intenzita proudění vzduchu, který z ní vychází. Ze studie této závislosti plyne, že největší ovlivnění přináší zvýšení toku proudění. Z energetických či jiných důvodů to není vždy úplně možné. Proto jako alternativa optimalizace odvlhčovacích vlastností se nabízí změna geometrie, vedoucí ke zvětšení úhlu proudění, což je například možné docílit zmenšením odsazení dozadu od palubní desky. [10]

### 2.2.3 Rozmrazování skel

Velmi důležitý dopad na charakter a funkci proudění vzduchu v kabině osobního vozu má také ofukovací vyústka pod čelním sklem, starající se o distribuci vzduchu na čelní sklo. Několik studií se zabývalo vlastnostmi rozmrazovací mřížky této vyústky, vizualizací proudu z ní a zkoumáním jejího vlivu na tvar proudu. Na VUT Brno byly provedeny praktické měření těchto mřížek v palubní desce vozidla Škoda Octavia II 3D sondou a sondou SY, čímž bylo navázáno na předchozí práci provedenou zařízením CTA s dvoudrátkovou sondou. Touto metodou byly také detailně popsány rychlostní pole vycházející z vyústky. Práce pomocí 3D sondy přinesla daleko přesnější výsledky s řádově menší nejistotou výsledku. [11] Dále například na Korejské univerzitě byl pomocí CFD modelů zkoumán a stanoven ideální rozsah úhlů dopadu proudění z této vyústky v rozmezí od  $15^\circ$  -  $20^\circ$ , tak aby byla pokryta celá plocha čelního skla, jeho rozmrazení bylo co nejrychlejší a zároveň bylo rovnoměrné. [12]



Obrázek 5 - Rozmrazovací mřížka pod čelním sklem

<sup>1</sup> Heating, ventilation, air-conditioning – Topení, ventilace a klimatizace

### 2.2.4 Nepřímá výměna vzduchu

Ve spojitosti s výústkami pod čelním sklem se také hovoří o použití těchto výústek k nepřímé výměně vzduchu a klimatizaci interiéru osobního automobilu. Na základě experimentu ve spolupráci se společnostmi AUDI a Faurecia je to jeden z možných konceptů trendů v klimatizování a větrání osobních automobilů, za předpokladu přizpůsobení výústění z HVAC jednotky a ovládacích prvků větrání. [13]

### 2.2.5 Tepelný komfort

Tepelný komfort se posuzuje podle 6 základních parametrů tepelné soustavy interiéru auta: teplota vzduchu, vlhkost vzduchu, střední radiační teplota, rychlost vzduchu, lidská aktivita a izolace oblečením. Měřením těchto parametrů a zkombinováním jejich efektů lze vytvořit modelové analýzy výpočtu tepelného komfortu. [14]

Při příliš nízké teplotě dochází ke svalovému třesu, který může vést k nedostatečné pozornosti řidiče. Vyšší teplota nám zase může navodit pocit pohodlí, a s tím spojenou únavu, ospalost a malátnost. [15] Velmi důležité je také nastavovat regulaci teploty v automobilu s rozvahou, s ohledem na okolní teplotu. V případě klimatizování na nižší teplotu by neměl být překročen rozdíl mezi vnitřní a venkovní teplotou o více než 10 °C, avšak optimální teplotní rozdíl je okolo 5°C. Před koncem cesty je také dobré velké teplotní rozdíly postupně dorovnávat, aby teplotní šok nebyl tak velký. [16]

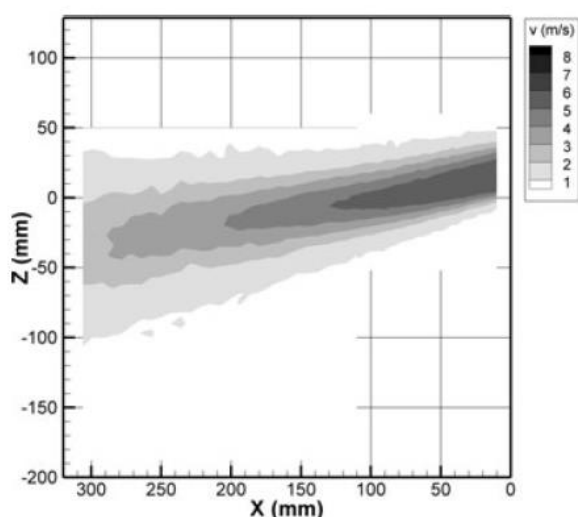
Všechny tyto funkce vzduchotechniky automobilu mají dopad také na pasivní bezpečnost posádky. Optimální teplota a dostatečný přísun čerstvého vzduchu můžou přispívat tomu, aby řidič zůstal delší dobu svěží a plně koncentrovaný na svůj řidičský výkon, a tím minimalizovat možnost lidské chyby vedoucí k autonehodě.

### 3 Testování výústek

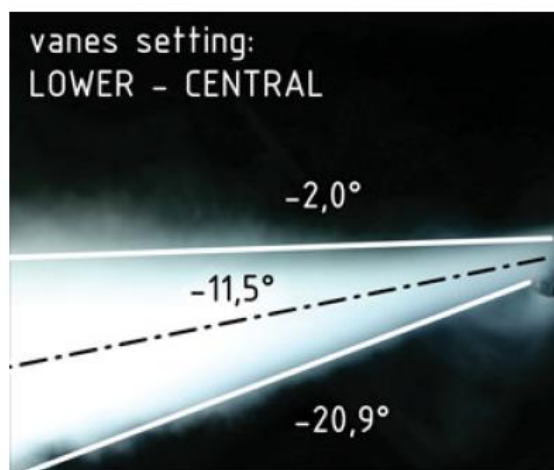
Pro hlubší pochopení charakteru a chování proudu, vycházejícího z výústek, je třeba provést experimentální testování. Z těchto experimentů lze později odvodit závislost výstupních parametrů proudu na změně vstupních parametrů systému. Mezi vstupní parametry můžeme zařadit například geometrii výústky, geometrii potrubí, tvar lamel apod.

Další faktor, který ovlivňuje charakter proudění je přítomnost a tvar mřížky, sloužící k difuzi proudícího vzduchu. Toto vede k uklidnění proudu a zefektivnění klimatizace či topení. Experimenty těchto systémů, používaných v budovách bylo dokázáno, že při výměně rovných lamel této mřížky za lamely s vlnitým profilem, je dosaženo ještě většího tepelného komfortu. [17]

Jeden ze základních závěrů testování je dále fakt, že výústky klimatizace téměř nikdy nedosáhnou požadovaného úhlu proudění a úhel nastavení výústky se s úhlem osy proudění ve většině případů neshoduje, přičemž mezi úhlem osy proudu a úhlem nastavení lamel není přímá závislost. Proudění bylo zkoumáno jak vizualizací kouřovou metodou, tak analýzou rychlostního pole metodou CTA. Tento experiment také ukázal daleko větší úhel v horizontální rovině, než v rovině vertikální. [18]



Obrázek 6 - Vizualizace rychlostních polí metodou CTA stejného nastavení výústky jako na obrázku [18]



Obrázek 7 - Vizualizace výústky, s lamelami nastavenými na DM, kouřem prosvětleným zdrojem světla skrz štěrbinu [18]

#### 3.1 Vliv tvaru výústky

I přesto, že se z proudu jakéhokoli tvaru po určité vzdálenosti stane proud s kruhovým průřezem, tak i tvar výústky má dopad na intenzitu větrání a tepelný komfort. Na univerzitě v Bangalore tedy provedli vizualizaci pomocí CFD modelů různých tvarů výústek s ohledem na distribuci vzduchu a komfort cestujících v kabině vozu. Jako základ byla položena čtvercová výústka, se kterou dále porovnávali kruhovou, eliptickou a kombinaci, kdy středové výústky byly tvořeny čtvercovými a krajní kulatými. Ze závěrů tohoto výzkumu je patrné, že nejlepší vlastnosti vykazuje výústka kruhová. Charakter proudění z kruhové výústky způsobuje o 5% lepší ochlazení při čtyřikrát menším působení proudu na smysly, než výústka čtvercová (hodnoty zjištěny programem RADTHERM). [19]

U ventilačních vyústek hraje roli i design, přičemž kruhové vyústky nezapadají do koncepce interiéru mnoha osobních automobilů. Kulaté vyústky můžeme například najít u menších vozů v nabídce automobilky Audi, jako například model A3, nebo A1, či kupříkladu vozy značky Mercedes-Benz. Daleko častější je výskyt obdélníkových, popřípadě lichoběžníkových vyústek. Kulatých vyústek je využito hlavně v segmentu užitných automobilů a dopravních prostředků, mezi které můžeme zařadit například autobusy, nebo traktory.



Obrázek 8 - Kruhová vyústka automobilu Mercedes-Benz B-Klasse [20]



Obrázek 9 - Kruhová vyústka automobilu Audi A1 [21]

### 3.2 Vliv počtu vyústek na kvalitu větrání

Právě testováním ventilačních vyústek pro traktory se zabývá experiment ze Srbské univerzity Novi Sad. Předmětem jeho zkoumání byl vliv tří, čtyř kruhových vyústek a velké větrací perforace ve stropě kabiny traktoru na kvalitu větrání, zvláště s ohledem na lokální výkyvy teplot, celkovou a lokální distribuci vzduchu okolo pasažérova těla. Jako nejlepší se zde ukázalo řešení použití většího počtu vyústek, tedy 4. Jen o trochu horší byl výsledek perforovaného stropu a z experimentu tedy vyplývá, že se zvětšující se větrací plochou vyústek v kabině, se zlepšuje cirkulace vzduchu. [22]

### 3.3 Experimentální testování směřování vyústek

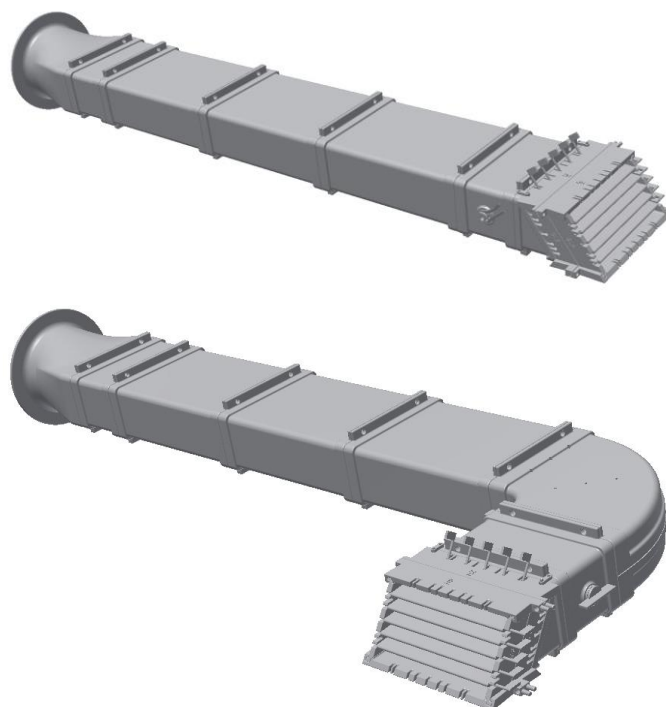
Převážně na experimentální měření se zaměřuje Laboratoř klimatizací na Energetickém ústavu VUT v Brně.

Jedny z prvních experimentů byly provedeny vizualizací kouřovou metodou, prosvícenou zdrojem světla, procházejícím skrz štěrbinu. Experimenty byly prováděny na vyústce z osobního automobilu Škoda Octavia druhé generace, přičemž regulace probíhala skrz originální panel z tohoto automobilu. Práce probíhala paralelně s další prací, která se soustředila na provedení experimentu metodou CTA. Výsledky obou až na drobné odchylky korespondovaly. [23, 24] Způsob testování, vyhodnocování a zveřejnění výsledky daly podnět a základ k dalším pracím věnovaným tomuto testování.

Další experiment přinesl revizi měřicí tratě, přičemž odhalil její nedostatky v přílišné složitosti. Byla proto vytvořena nová trať s minimem změn směrů. Došlo také ke změně zdroje světla pro prosvícení proudu na laser, který se v optické soustavě několika čoček zformoval do podoby roviny – tzv. „laserového nože“.[25]



Při dalším testování na FSI VUT byla měřicí trať nahrazena novou, stejně jako vyústka z Octavie II byla nahrazena variabilní vyústkou s možností výměny a změny pozice lamel, vše vytvořeno metodou *rapid prototyping*<sup>2</sup>. Hlavním důvodem změny podoby vyústky zde byla změna modelové řady a příchod třetí generace vozu Škoda Octavia, a s tím požadavek otestování optimální podoby vyústek klimatizace této nové generace. Ovládací panel z vozu byl nahrazen zdrojem napětí, kterým lze měnit průtok efektivněji. Bylo provedeno zdokonalení záznamového řetězce za účelem lepší opakovatelnosti pokusů a lepší ovladatelnosti měření. Dále proběhlo testování různých druhů detekce obrazu s cílem nalezení co nejlepší a nejpřesnější metody. [3]



Obrázek 10 - 3D sestava nové měřicí trati pro následný 3D tisk [Pech]

V současné době probíhají měření hlavně za účelem optimalizace počtu a pozice lamel, s cílem co nejlepšího horizontálního i vertikálního směrování proudu.

### 3.3.1 Vliv kolene na měřicí trati

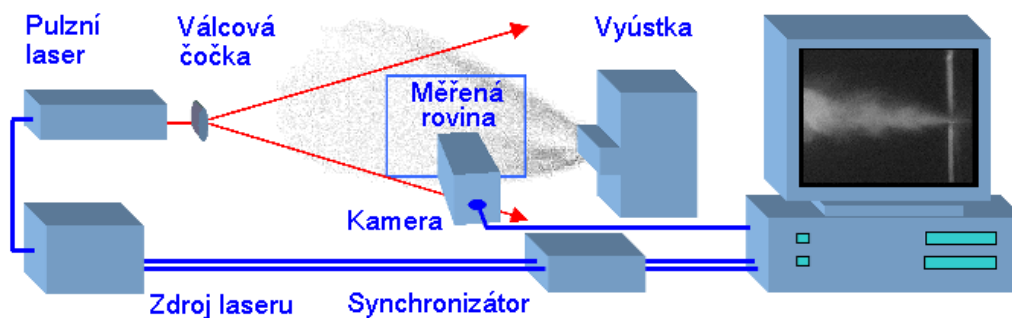
Měření byla prováděna s kolenem předsazeným vyústce i s rovným kanálem bez změny směru. Z výsledku plyne, že koleno ve vertikální rovině XZ zužuje proud o  $1,61^\circ$  a v horizontální rovině XY je proud zúžen dokonce o  $3,27^\circ$ . Tento efekt lze však poměrně snadno redukovat použitím obloukových směrovacích lamel po celé délce kolene.[26]

---

<sup>2</sup> 3D tisk

### 3.4 Využití moderních metod při testování

Mezi moderní způsoby vizualizace a měření patří také metoda PIV<sup>3</sup>. Proud je při této metodě vizualizován zaváděním částic a následně je zpracována vektorová mapa rychlostního pole proudění z vyústky. Proud je přitom prosvětlován světelným svazkem z pulzního laseru a válcovou čočkou upraven do tvaru světelné roviny. Osvětlená rovina leží v zorném poli záznamového zařízení, nejčastěji CCD kamery, která musí být svou frekvencí snímání synchronizována s pulsním laserem. Při známém měřítku je tedy v dané souřadné rovině xy možno vyhodnotit přesné polohy částic a jejich posunutí  $\Delta x$   $\Delta y$  ve známém časovém intervalu  $\Delta t$ . [27]



Obrázek 11 - Schéma PIV metody [27]

Právě PIV metodou byly porovnávány tři směry ventilace a to: směřování na řidiče, ve směru středového tunelu a směřování na pasažéra. Tyto tři směry byly testovány třemi způsoby: ofukování z vyústek na palubní desce, rozmrazovací vyústkou a ofukování nohou. Rychlostní pole jsou významně ovlivněna způsobem ventilace, nicméně jejich tvar se nijak výrazně nemění se změnou intenzity proudění. Nejkomplexnější strukturu proudění nabízí způsob ofukování vyústkami na palubní desce, avšak zde proudění vykazovalo největší recirkulaci v důsledku překážek v interiéru vozidla, jako například volant, či středový tunel s ruční brzdou. Na základě těchto experimentů je možné hlubší pochopení charakteru proudění ve skutečném interiéru, které můžou sloužit jako zdroj vylepšení numerických modelů pro přiblížení se reálnému interiéru. [28]

Tímto způsobem lze kromě menších oblastí u kořene proudu zkoumat také velmi rozsáhlé oblasti za použití vysoce výkonných 2D-PIV systémů. Můžeme tak vyhodnotit například charakter proudění v průřezu paluby letadla. Takovéto měření při izotermních podmínkách i v průběhu chlazení ukázalo, že rozsáhlé prostory, jako je paluba letadla vykazuje velmi malé rychlosti proudění, při velké míře turbulence proudu. Přitom se ukázalo, že izotermní proudění vykazovalo nesymetrický charakter napříč palubou letadla a ochlazované proudění vykazovalo charakter symetrický. Z toho plyne, že při testování klimatizovaným

<sup>3</sup> Particle image velocimetry - laserová anemometrie

vzduchem je třeba počítat s interakcí sil, která vzniká v důsledku působení síly proudu studeného vzduchu a vztlakové síly způsobené stoupáním vzduchu teplého.[29]



Obrázek 12 - Testovací kabina proudění vzduchu v letadle [29]

Při testování proudění uvnitř letadla se v rozsáhlých oblastech, kde proudění zkoumáme, také významnou měrou podílí Coandův efekt. Tento efekt způsobuje, že proud proudící z výstky poblíž stěny se k této stěně přilne v důsledku nízkého tlaku mezi proudem a stěnou.[30]

### 3.5 CFD simulace proudění z vyústek

Stále častěji dochází při vizualizaci proudění z klimatizace k dynamickému softwarovému modelování, takzvané CFD simulaci proudění, přičemž se neustále vyvíjí sofistikovanější modelovací systémy schopny simulovat a předpovědět chování samotného proudu, proudění vodní páry, šíření tepla mezi vzduchem a vodní párou, vše s ohledem na snížení emisí a zvýšení efektivity spotřeby paliva.[31]

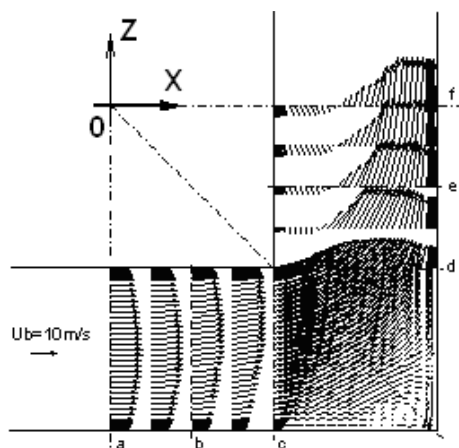
Tyto výpočtové modely se můžou potýkat s nepřesností simulace například z důvodu jevů změn hybnosti a vnitřního tření. Typickým případem problémového chování jsou například Reynoldsova napětí, která vznikají v turbulentním proudění.[32, 33]

Pro tyto účely existuje mnoho modelů, které se dále aplikují na simulace proudění. V rámci výzkumu na univerzitě Toowoomba v Austrálii byly provedeny experimentální měření proudění metodou LDA<sup>4</sup> pro 90° koleno, které se nachází na měřicí trati vyústky, a výsledky byly následně porovnány s různými výpočtovými modely. Model Reynoldsových napětí ukázal nejlepší výsledky hned za kolenem, avšak nejlepší predikci proudění dále od kolena vykazuje  $k - \varepsilon$  model proudění. Tato měření dokazují, že na vývoji modelů je třeba neustále pracovat k jejich zdokonalení.[34]

---

<sup>4</sup> Laser Doppler Anemometry





Obrázek 13 - Průběh vektorů rychlosti napříč prouděním 90° kolenem[34]

### 3.5.1 Studie dynamického větrání pomocí CFD modelu

Další možné vylepšení současného konceptu ventilačních výústek nabízí studie, která se zabývá CFD simulací dynamických výústek. Jedná se o výústky, které budou podle algoritmů, které se řídí lokálními teplotami a senzory monitorující stav vzduchu, dávkovat čerstvý vzduch do všech směrů, skrz celý interiér osobního vozu. Takto řízené klimatizování může mít za následek rychlejší ochlazení, přičemž v simulaci bylo možno dynamicky řízeným klimatizováním dosáhnout během 25 minut o 3°C nižší teplotu, než při manuálním nastavování. Tento způsob podle studie také lépe ustaluje teplotu na určité hodnotě. Dávkováním, tedy řízeným vypínáním a zapínáním HVAC systému, je také možno docílit vyšší efektivity spotřeby paliva. [35]

## 4 Použití výústek v osobních automobilech napříč střední třídou

V různých segmentech můžeme nalézt mnoho různých variant výústek s různou geometrií a postavením lamel a v mnoha interiérech automobilů nalezneme kombinace různých geometrií, nebo dokonce charakteristických tvarů u krajních a u středových výústek. Hlavně v segmentu menších automobilů tak můžeme najít například kombinaci kruhových a obdélníkových výústek.

V této práci se jedná o testování ventilačních výústek, které bude zdrojem informací pro vývoj hlavně ventilační výústky pro vůz Škoda Octavia III. Toto vozidlo, podle svazu dovozců automobilů, spadá do střední třídy automobilů. Proto v následujících odstavcích uvedu některá řešení výústek, která se používají napříč od nižší střední třídy až po vyšší střední třídu. [36]



Obrázek 14 - Interiér vozu Škoda Octavia III [37]

V současné době Škoda Octavia používá poměrně dlouhé výústky s pěti horizontálními lamelami v přední řadě a pěti vertikálními v řadě zadní.

## 4.1 Nižší střední třída

V segmentu nižší střední třídy jsou typy výústek poměrně různorodé. Většina automobilů v této třídě má uspořádání s prvními lamelami horizontální s výjimkou Fordu Focus, který má velmi vysoké výústky, které mají vpředu 3 vertikální lamely a to jak uprostřed, tak na stranách.

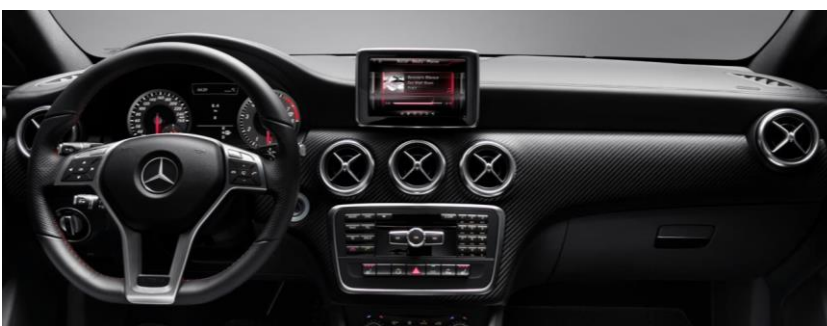


Obrázek 15 - Interiér vozu Ford Focus [38]

Atypické výústky pak můžeme najít v Audi A3, kde nalezneme kruhové lamely, sbíhající se do středu této kruhové výústky. Taktéž Mercedes-Benz A-Klasse využívá výústky kruhového tvaru a lamely v ní jsou uspořádány do tvaru písmene X, s jednou zadní lamelou v podobě soustředné kružnice.



Obrázek 16 - Interiér vozu Audi A3 [39]



Obrázek 17 - Interiér vozu Mercedes-Benz A-Klasse [40]

V Seatu Leon, Volvu V40 a Peugeotu 308 jsou vysoké obdélníkové výústky s prvními lamelami horizontálními, přičemž Peugeot má nastavovací pouze prostřední část středových výústek a na krajích používá výústky nízké a dlouhé, pro lepší směřování do stran.



Obrázek 18 - Interiér vozu Seat Leon [41]



Obrázek 19 - Interiér vozu Volvo V40 [42]



Obrázek 20 - Interiér vozu Peugeot 308 [43]

Volkswagen Golf a BMW řady 1 mají klasické vyústky s prvními horizontálními lamelami, u VW s pěti a u BMW se čtyřmi lamelami.



Obrázek 21 - Interiér vozu Volkswagen Golf [44]



Obrázek 22 - Interiér vozu BMW řady 1 [45]



## 4.2 Střední třída

Většina zástupců střední třídy také používá obdélníkové vyústky s prvními lamelami horizontálními. Volkswagen Passat a Audi A4 mají velmi dlouhé vyústky se třemi horizontálními lamelami vpředu, BMW řady 3 a Ford Mondeo o něco kratší čtyřlamelové varianty.



Obrázek 23 - Interiér vozu Volkswagen Passat [46]



Obrázek 24 - Interiér vozu Audi A4 [47]



Obrázek 25 - Interiér vozu BMW řady 3 [48]



Obrázek 26 - Interiér vozu Ford Mondeo [49]

Mazda 6 má na středovém panelu nižší obdélníkové vyústky s pěti horizontálními lamelami vpředu a na krajích jsou vyšší obdélníkové s totožným počtem lamel.



Obrázek 27 - Interiér vozu Mazda 6 [50]

Opel Insignia kombinuje výhody směřování vyústky s prvními horizontálními lamelami po stranách a s prvními vertikálními na stranách středového panelu, které poskytují dobré směřování do stran



Obrázek 28 - Interiér vozu Opel Insignia [51]

U automobilu Mercedes-Benz C-Klasse opět najdeme kruhové vyústky se třemi horizontálními lamelami vpředu, přičemž nastavitelné jsou obě krajní i všechny tři, které se nachází na středovém panelu.



Obrázek 29 - Interiér vozu Mercedes-Benz C-Klasse [52]

### 4.3 Vyšší střední třída

Ve vozech vyšší střední třídy se vyskytují hlavně obdélníkové vyústky. Zpravidla se zde vyskytuje pořadí lamel s prvními horizontálními a druhou řadou vertikálních. U Audi A6 nalezneme 5 horizontálních lamel při vyšší výšce vyústky, u BMW řady 5 pouze 3 horizontální lamely, avšak vyústky jsou velmi dlouhé a nízké. U automobilu Mercedes-Benz E-Klasse naopak najdeme vyústky kruhové, přičemž po stranách jsou vyústky nastavitelné do všech stran se třemi horizontálními lamelami vpředu a na středovém panelu nalezneme 4 kruhové vyústky nastavitelné pouze nahoru a dolů.



Obrázek 30 - Interiér vozu Audi A6 [53]



Obrázek 31 - Interiér vozu BMW řady 5 [54]



Obrázek 32 - Interiér vozu Mercedes-Benz E-Klasse [55]



## 5 Metody použité během experimentu

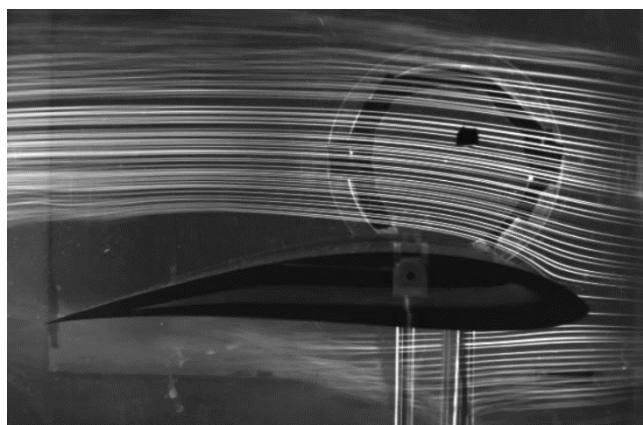
### 5.1 Metoda vizualizace

Pro experiment byla použita metoda vizualizace kouřem, sloužící ke zviditelnění proudící tekutiny, zejména proudícího vzduchu. Vzduchová masa vystupující z vyústky má často velmi komplikovaný tvar a trajektorie částic za normální situace nelze přímo pozorovat. Vizualizační metody tedy slouží ke zviditelnění těchto jevů za účelem kvalitativního pozorování a sledování trajektorií. V případě, že jsou nám velmi dobře známy vazby mezi sledovaným objektem a vizualizační látkou, jsme schopni posoudit proudění také z kvantitativního hlediska. V tomto případě se vizualizační metoda stává zároveň i metodou měřicí. [27]



Obrázek 33 - Vizualizace pomocí souvislého proudu kouře prosvíceného laserem

Samotná metoda vizualizace kouřem patří do metod zavádění látek, či částic do objemu tekutiny a jde o poměrně rozšířenou a snadno proveditelnou metodu vizualizace. Mimo námi použitou metodu, využívající souvislý proud kouře, se na vizualizaci také používá metoda *Smoke-wire*<sup>5</sup>, a to v případě pokud nás zajímají přesné trajektorie částic tekutiny. [27]



Obrázek 34 - Vizualizace metodou „Smoke wire“ [56]

---

<sup>5</sup> Zavádění kouřových vláken do proudu



My však chceme sledovat proudění v otevřeném prostoru, kdy se sleduje celé proudové pole, a používáme metodu, při které zavádíme souvislý proud kouře. Tato metoda je vhodná při zkoumání právě vzduchotechnických zařízení. K dosažení zpracovatelného výsledku je nutné prosvětlit proud kouře zdrojem světla, nejčastěji laserem a následně záznamovým zařízením (fotoaparát, kamera) zachytit obrazový materiál, který jsme dále schopni zpracovávat. Z výsledků je možné zjistit tvar a směřování proudu. [27]

## 5.2 Způsob zviditelnění proudu

Pro zviditelnění proudu je použit generátor mlhy SAFEX-NEBELGERÄTS 195SG. Fun- guje na principu odpařování olejovité kapaliny za vzniku mlhy. Součástí je také panel na ovládání intenzity generování mlhy se stupnicí 1 – 10. Generátor je napojený na kumu- lační krychli z plexiskla, ze které je mlha nasávána ventilátorem a distribuována přes uklid- ňovací potrubí DN 65 PN 6 od firmy MATTEC s.r.o. přes regulační clonu a přechodku do vzduchovodu s vyústkou.

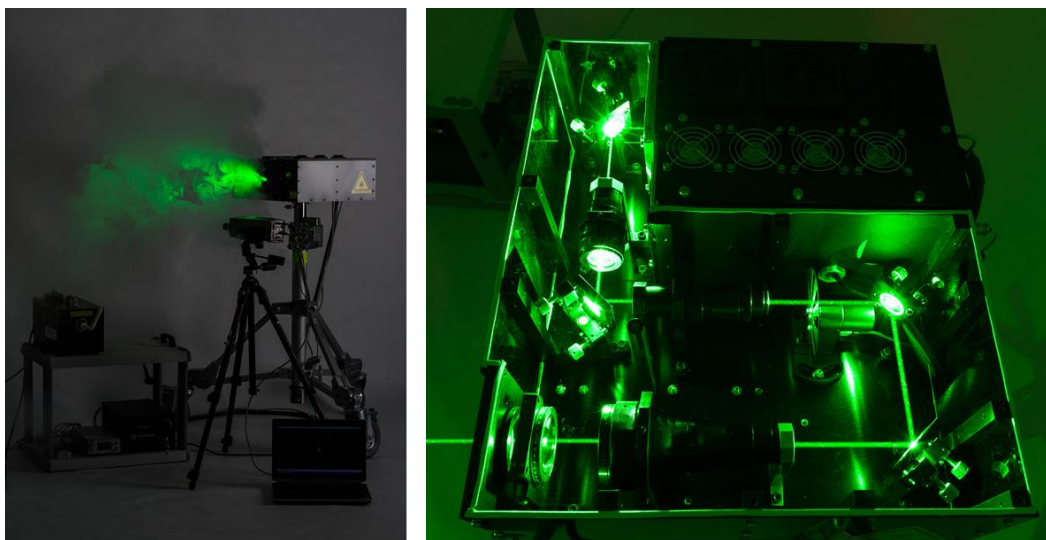


Obrázek 35 - Kouřový generátor SAFEX [57]

## 5.3 Způsob prosvětlení

Pro prosvícení proudu kouře je použit laserový nůž zkonstruovaný firmou LAO – průmys- lové systémy s.r.o. Tato rovina jako základ používá 2W kontinuální laser s vlnovou délkou 532 nm značky COHERENT a soustavu čoček, které rozloží laserový paprsek do podoby roviny. V optické soustavě je umístěn například *beam expander*, kterým můžeme nastavovat šířku světelné roviny a nová válcová čočka, která nám rozšiřuje úhel rozsahu světelné

roviny a poskytuje možnost ji libovolně otáčet do potřebného úhlu. [58] Laserová rovina byla ovládána přes počítač programem OPSL.



Obrázek 36 - Laserová rovina s detailem na optickou soustavu uvnitř přístroje [58]

## 5.4 Způsob zaznamenávání obrazových dat

Pro zaznamenávání obrazových dat vizualizovaného proudění je použit DLSR<sup>6</sup> fotoaparát Canon EOS 300D s objektivem Canon EF 17-40 mm f/4,0 L USM. Jelikož jde o fotoaparát s velikostí čipu APS-C<sup>7</sup>, je tedy třeba započítat tzv. „Crop Factor“ fotoaparátu s menším čipem. Po přepočtení má tedy objektiv ohniskovou vzdálenost 27-64 mm. Fotoaparát je nastaven v režimu M (plně manuální), jelikož splňuje naši potřebu měnit parametry snímání nezávisle na sobě (clona, čas, citlivost).[59] Abychom neovlivnili měření pohybem či rozostřením fotoaparátu a docílili co nejlepší opakovatelnosti experimentu, je použit software Remote Capture, který po připojení fotoaparátu do USB rozhraní počítače funguje jako dálkové ovládání fotoaparátu a ukládá snímky přímo do počítače.



Obrázek 37 - Fotoaparát Canon EOS 300D (v U. S. verzi nesoucí název Canon EOS Kiss Digital) [60]



Obrázek 38 - Objektiv Canon EF 17-40mm f/4.0 L USM [61]

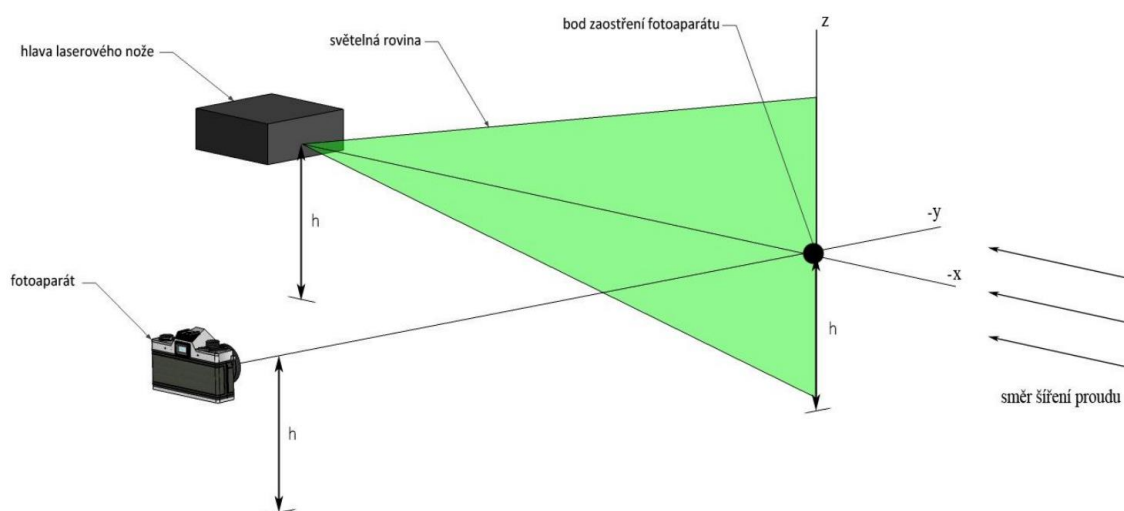
<sup>6</sup> Digital single-lens reflex

<sup>7</sup> 22,2 mm x 14,8 mm (Full frame je 36 mm x 24 mm)

## 5.5 Geometrie použitých zařízení

Důležitou součástí experimentu je zajištění přesné geometrie jednotlivých zařízení vůči sobě. Je třeba zajistit, aby laserová rovina procházela osou proudu, přičemž oblast nejsilnějšího záření laseru by se měla nacházet v místě mezi vyústkou a předpokládaným směrem proudění. Dále zajišťujeme kolmost fotoaparátu na laserovou rovinu tak, aby rovina výsledné fotografie byla rovnoběžná s rovinou nože. Fotoaparát se zaostřuje na bod přibližně 65 cm od okraje vyústky a je přiblížen tak, aby byla v záběru celá oblast zájmu proudění, včetně okraje vyústky pro stanovení úhlu proudění vůči tomuto okraji.

## 5.6 Způsob zaznamenání ostatních dat



Obrázek 39 - Schéma geometrie použitých zařízení [3]

Záznamový řetězec doplňujících veličin je zprostředkován pomocí nástroje PechComet\_V7, vytvořeného v softwaru LabView. Tento program zaznamenává teplotu a tlak v laboratoři, teplotu vzduchu před a za ventilátorem, tlak před clonou a tlakovou ztrátu clony a vyústky. Jako záznamová zařízení zde slouží potrubí, odběr diferenčních tlaků před a za clonou s převodníkem tlaku Airflow PTSXR, připojeným do vstupního analogového modulu NI 9215, snímač okolních podmínek Testo 400 a dvě odporová teplotní čidla PT100, připojená do vstupního analogového modulu NI 9217 a vše je připojeno v základně slotů cDAQ-9172. [3]

## 5.7 Vyhodnocení obrazového materiálu

Následné vyhodnocení snímků je provedeno optickým rozpoznáním obrazu, konkrétně metodou segmentace obrazu s počítačovou podporou. Segmentace je rozdělení obrazu na části, které odpovídají skutečným objektům, které se v obraze vyskytují. Tyto objekty mohou být rozpoznány různými způsoby. Nejčastěji se používá metoda založená na detekci hran objektů, založená na rozpoznání změny jasu v místě přechodu. Volba parametru detekce, tedy úrovně jasu, záleží na míře rušivých elementů na snímku tak, aby nezanikl kořen proudu hned u vyústky, který bývá při experimentech nejméně výraznou částí proudu. [3]

## 6 Popis Experimentu

Tato práce probíhá paralelně s diplomovou prací P. Caletky, která se zabývá testováním různých kombinací tří a pěti lamelových vyústek. Z těchto experimentů byly vytvořeny závislosti kvality směrování proudu na počtu lamel. Závislosti jsou zobrazeny ve formě směrnic, kdy zůstává jedna řada lamel konstantní, a my můžeme sledovat, jak se mění kvalita směrování při změně počtu lamel v druhé řadě. [62]

Tyto směrnice jsou pouze orientační a jsou tvořeny jen dvěma body – při třech a pěti lamelách, přičemž hodnotou pro čtyři prochází pouze teoreticky. Tato práce je tedy zaměřená na experimentální testování všech kombinací vyústek, ve kterých jsou vpředu či vzadu čtyři lamely a to jak horizontální, tak vertikální. Výsledkem tohoto experimentu bude doplnění stávajících směrnic o bod třetí, což nám přinese hlubší pochopení závislosti vlivu počtu lamel na úhlu směrování vyústky. Taktéž dojde k vytvoření dvou nových směrnic, opět o třech bodech.

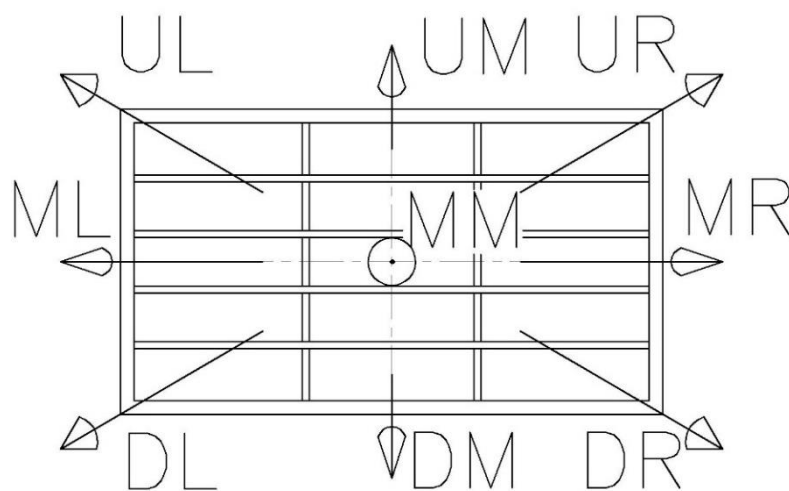
### 6.1 Výroba vyústek

Na základě rozšíření výzkumu o čtyřlamelové varianty vyústek byly vytvořeny nové 3D modely v programu Autodesk Inventor. Jednalo se o modely bočních stěn vyústky a nastavovacích bočnic pro čtyři lamely. Tyto modely byly následně vytištěny metodou *rapid prototyping* na Ústavu Strojírenské Technologie FSI VUT. Povrch bočnic byl obroušen, aby nedocházelo k ovlivnění proudu drsností vytisknuté součásti, stejně jako hrany bočnic pro jejich snadnější výměnu.

### 6.2 Testované varianty vyústek

Experiment je prováděn pro 10 variant vyústek s výskytem čtyř lamel. Každá z variant je nasnímána ve čtyřech polohách, přičemž pro boční měření jsou snímány pouze dvě a pro spodní měření jsou použity všechny čtyři.

Nastavení lamel vyústky se provádí otočením a aretací drátku lamely do jedné ze tří pevně definovaných poloh v nastavovací destičce. Takové nastavení se provádí jak pro horizontální, tak pro vertikální lamely. Celkem je tedy možno nastavit 9 poloh směrování proudění z vyústky, znázorněné na obrázku 40.



Obrázek 40 - Návrh všech 9 možných nastavení vyústky

Pro měření jsou použity následující polohy:

ML – nastavení horizontálních lamel do střední polohy a vertikálních doleva

MR – nastavení horizontálních lamel do střední polohy a vertikálních doprava

UR – nastavení horizontálních lamel nahoru a vertikálních doprava

DL – nastavení horizontálních lamel dolů a vertikálních doleva

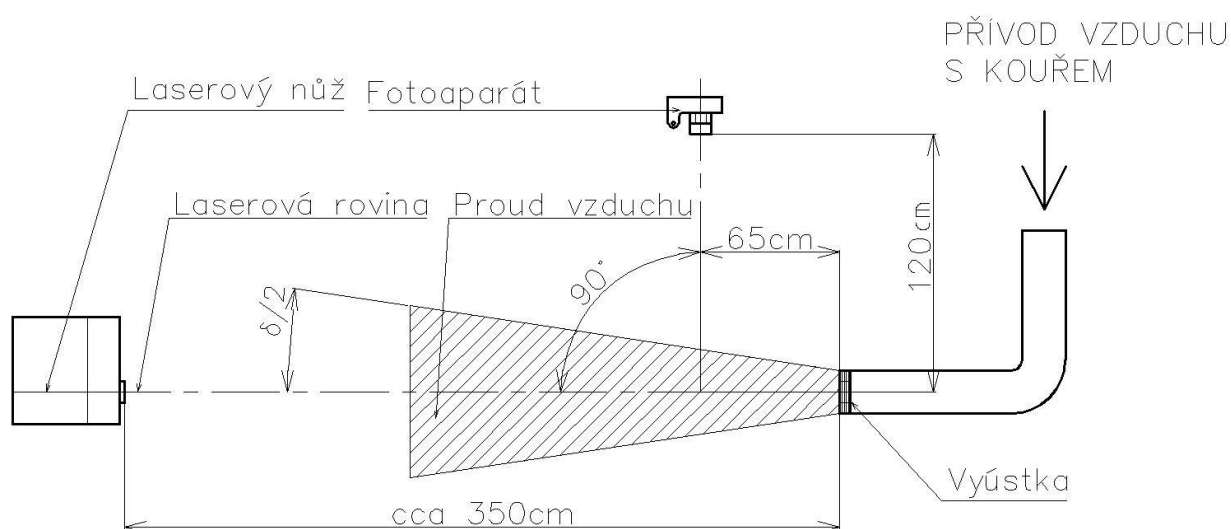
### 6.3 Příprava experimentu

Před samotným experimentem je nutné sepnout elektrický rozvaděč napájející ventilátory, kterými je možné laboratoř odvětrat. Dále je nutné zapnout do sítě generátor kouře, aby se mezi dalšími přípravami nahřál a byl připraven k provozu, laserovou rovinu a všechny měřicí sondy, kterými je trať osazena.

Před měřením každé varianty vyústky je nutné nastavit správný průtok  $33,5 \text{ m}^3/\text{hod}$ . Tento průtok byl stanoven během dřívějších experimentů a je referenční hodnotou pro všechna testování. Toto nastavení je nutné provést vždy s lamelami nastavenými v referenční poloze MM. Můžeme tedy porovnat ztrátu v průtoku s ostatními polohami lamel.

#### 6.3.1 Příprava měření z boku

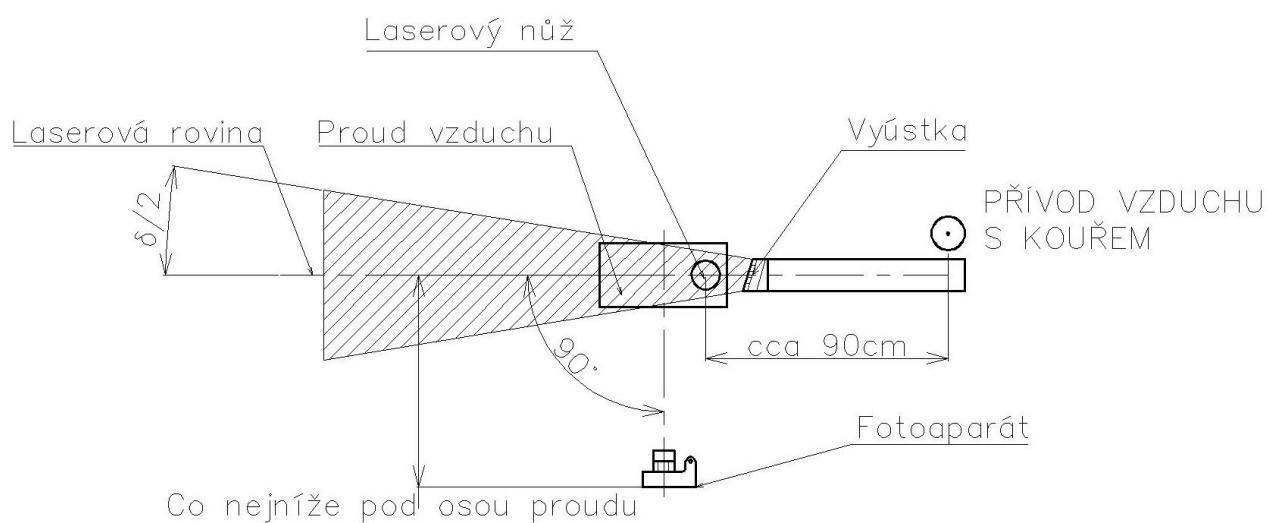
Po nastavení požadované polohy vertikálních i horizontálních lamel je z generátoru kouře vytvořen testovací proud kouře, podle kterého se umístí zrcadlo na stojanu opticky do osy proudu, 65 cm od střední lamely vyústky. Po umístění zrcadla je do prostoru laboratoře umístěn stativ s DSLR fotoaparátem 120 cm od zrcadla. Fotoaparát je umístěn kolmo na zrcadlo tak, že přímo uprostřed hledáčku se nachází zrcadlový obraz středu čočky objektivu. Zaostření je provedeno na vzdálenost zrcadla, potažmo na okraj vyústky. Jakmile je fotoaparát umístěn kolmo na zrcadlo, stativ laserového nože je umístěn v ose proudu, cca 350 cm od vyústky. Následně je provedena kontrola směřování laserového paprsku, který by měl překrýt hranu zrcadla. Po těchto přípravách lze odstranit zrcadlo a měřicí trať je připravena pro boční měření.



Obrázek 41 - Schéma geometrie měření z boku

### 6.3.2 Příprava měření zespodu

Příprava vertikálního měření se provádí s tím rozdílem, že je fotoaparát umístěn pod proud. Laserový nůž je umístěn na straně od vyústky rovnoběžně s kanálem, vedoucím ke kolenu před vyústkou, cca 90 cm od osy tohoto kanálu. Podle směrování testovacího proudu kouře nahoru, popřípadě dolů, je nasměrován také paprsek laserového nože v horizontální ose proudu. Nastavení laserového paprsku do horizontální roviny je provedeno pootočením válcovou čočkou a následně je digitální vodováhou změřen úhel stoupání/klesání osy proudu. Podle tohoto úhlu nastavíme také úhel fotoaparátu, přičemž je zaostřen na spodní hranu vyústky, která se nachází na kraji záběru.

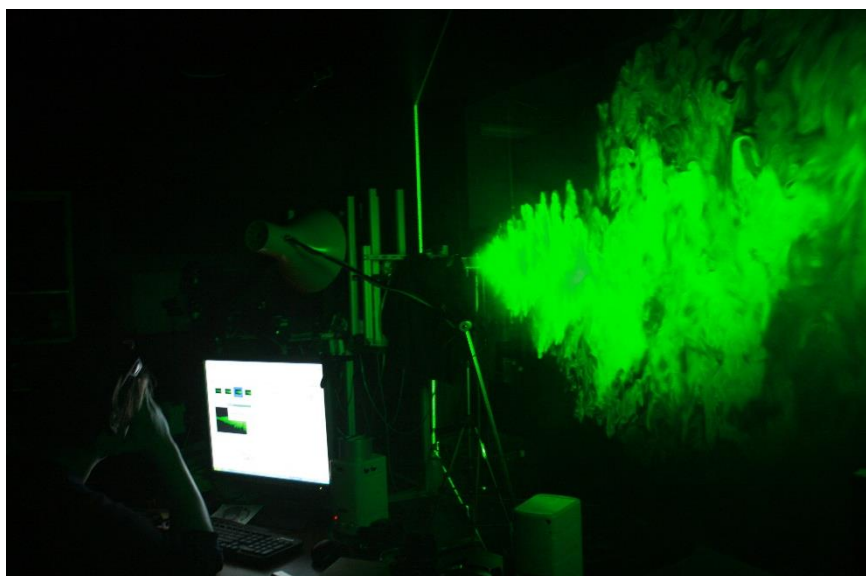


Obrázek 42 - Schéma geometrie měření zespodu



## 6.4 Provedení experimentu

Po přípravě měřicího schématu, zapnutí fotoaparátu je laboratoř ztemněna. Fotoaparát je nastaven na hodnotu clony 4,0, čas je nastaven na 1/10 a hodnota citlivosti ISO je 800. Laserový nůž je zapnut prostřednictvím programu dálkového ovládání, nejdříve v režimu REMOTE, poté přepnut do režimu LOCAL s intenzitou 2W. Před samotným snímáním je nutné spustit záznamový řetězec, snímající doplňkové veličiny měřící tratě. Následně je spuštěn generátor kouře, na kterém byl v průběhu měření použit stupeň intenzity generování kouře cca 4,5. Po naplnění celého proudu vzduchu kouřem je tento proud, vizualizovaný laserovým nožem, zaznamenán fotoaparátem. Je vykonána série 20 snímků, přibližně po třech sekundách, zpravidla okamžitě po uložení předchozího snímku.



Obrázek 43 - Fotografie zachycující průběh experimentu

Po provedení experimentu je třeba zapnout ventilaci laboratoře. Po odstranění veškerého kouře z prostoru laboratoře je možné změnit nastavení lamel a pokračovat v dalších experimentech.

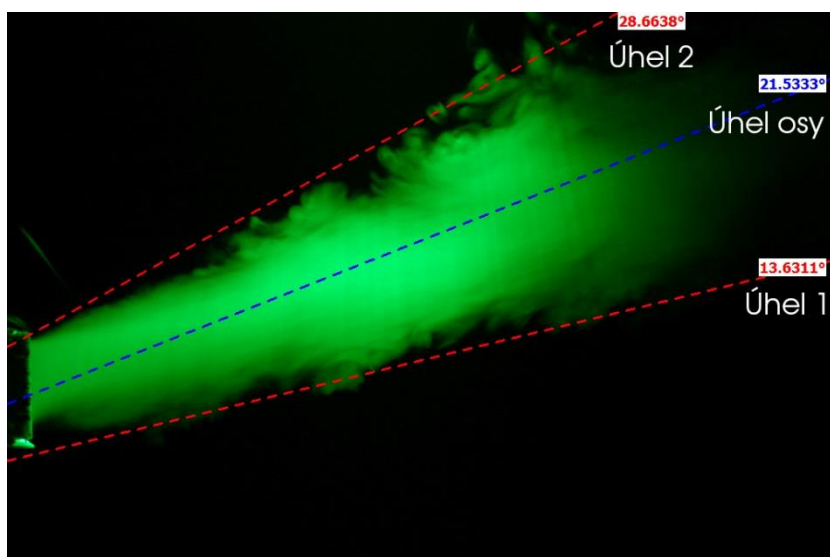
## 7 Vyhodnocení experimentu

Vyhodnocení obrazových dat, nasnímaných během experimentu, proběhlo v rámci paralelně vznikající bakalářské práce Richarda Cvrkala. Vyhodnocení probíhalo výběrem deseti snímků, z celkově nasnímaných dvaceti, pro každé z šesti nastavení vyústky. Těchto deset snímků bylo následně zpracováno programem na rozpoznání obrazu. Výstupem z těchto deseti snímků je snímek s vyznačenými úhly směřování a datový soubor, kde jsou všechny tyto úhly vypsány. [63]

### 7.1 Zpracování obrazových dat

Snímky byly vyhodnocovány tak, že došlo ke zjištění okrajů proudu pomocí segmentace obrazu. Přímkám, které tyto okraje kopírují, byly následně přiřazeny hodnoty úhlů vůči hraně vyústky. Také byl stanoven úhel osy proudu. Z těchto dat byl následně vyjádřen úhel rozevření proudu.

Úhel blíže spodní straně fotky, značen červeně je Úhel 1. Úhel, který je blíže straně horní, také červeně značen, je Úhel 2. Mezi nimi leží modře značený Úhel osy. Toto označení je zobrazeno na obrázku 44.



Obrázek 44 - Značení úhlu vyhodnocené fotografie [63, upraveno]

### 7.2 Kritérium pro porovnání

V rámci projektu pro ŠKODA Auto a.s. byly touto firmou stanoveny požadavky směřování, ke kterým by se v ideálním případě měly naměřené hodnoty ubírat.

Podle těchto hodnot lze přesně stanovit, která vyústka je na tom nejlépe a která naopak nejhůře.

Požadované úhly mají hodnoty:

Pro horní směřování je  $\alpha_u$  50 °

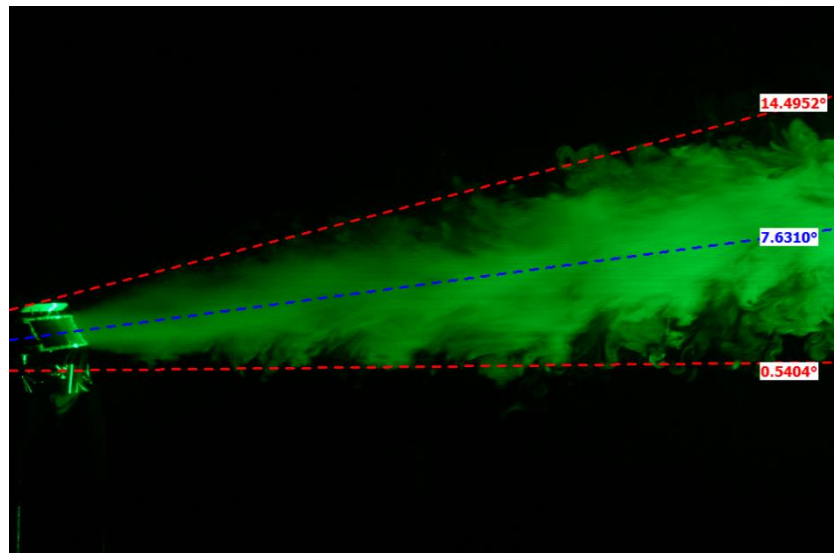
Pro spodní směřování je  $\alpha_d$  21,5 °

Pro směřování doleva a doprava jsou  $\alpha_l$  i  $\alpha_r$  45 °

Úhly pro horní a dolní směřování jsou pro pohled z boku a úhly doleva a doprava jsou pro spodní pohled.



Při vyhodnocení kvality směřování přičteme k výsledné hodnotě směrodatnou odchylku a porovnááme s požadovanou hodnotou úhlu směřování. Například při hodnocení kvality směřování nahoru přičítáme k absolutní hodnotě úhlu 2 hodnotu směrodatné odchylky a od tohoto čísla odečteme požadovanou hodnotu úhlu směřování nahoru. Takto vyhodnocený snímek můžeme vidět na obrázku 45.



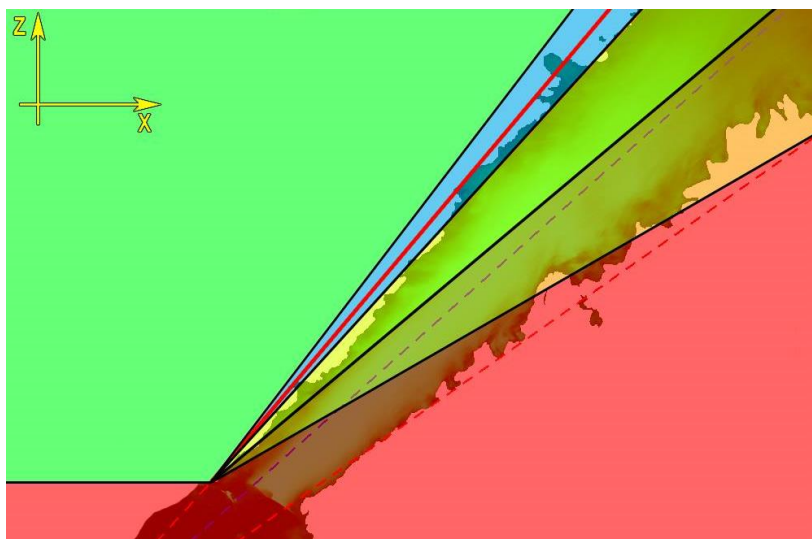
Obrázek 45 - Vyhodnocená fotografie pohledu 1UR vyústky 4V3H [63]

Na tomto vyhodnoceném snímku náleží úhlu 2, který má hodnotu  $\alpha_u = 14,5^\circ$  směrodatná odchylka s  $1,3^\circ$ . V případě směřování nahoru je požadovaná hodnota úhlu  $\alpha_u 50^\circ$ .

Výpočet tedy vypadá následovně:

$$\begin{aligned} r &= (|\alpha_2| + s) - \alpha_u \\ r &= (|14,5^\circ| + 1,3^\circ) - 50^\circ \\ r &= -34,2^\circ \end{aligned}$$

Rozdíl mezi požadavkem a skutečnou hodnotou je poté řazen do několika skupin, podle kvality směřování podle obrázku 46.



Obrázek 46 - Kvalitativní zařazení proudění podle odchylky od požadavku [62]

Tyto skupiny jsou barevně rozlišeny a podle rozdílu úhlu od požadovaného se dělí následovně:

Zelená náleží oblasti od  $+2,5^\circ$  do nekonečna a znamená výborné směřování

Modrá náleží oblasti od  $+2,5^\circ$  do  $-2,5^\circ$  a znamená dobré směřování

Žlutá náleží oblasti od  $-2,5^\circ$  do  $-10^\circ$  a znamená špatné směřování

Oranžová náleží oblasti od  $-10^\circ$  do  $-20^\circ$  a znamená horší směřování

Červená náleží oblasti od  $-20^\circ$  do méně nekonečna a znamená nejhorší směřování

Námi vypočtená hodnota  $-34,2^\circ$  tedy patří do červené oblasti a představuje tak nejhorší směřování.

### 7.3 Vyhodnocená data

V tabulce 1 jsou uvedeny hodnoty úhlů směřování pro všech 10 měřených variant výústek. V tabulce jsou uvedeny vedle úhlů okrajů, os a úhlu rozevření také rozdíly od požadovaných hodnot směřování proudu do jednotlivých směrů.

Tabulka 1 - Vyhodnocená data

		Úhel 1 ± odchylka (°)	Úhel 2 ± odchylka (°)	Úhel osy ± odchylka (°)	Úhel rozevření (°)	Rozdíl od požadavku (°)
<b>3H4V</b>	<b>1DL</b>	-20,2±1,4	-6,2±1,8	-13,4±1,1	13,9	+0,1
	<b>1UR</b>	19,0±2,2	32,3±3,6	26,0±2,6	13,2	-14,1
	<b>2DL</b>	8,4±3,1	20,3±2,5	14,5±2,2	11,9	-22,2
	<b>2ML</b>	17,3±2,1	31,0±1,9	24,5±0,9	13,7	-12,1
	<b>2MR</b>	-14,5±3,2	-0,2±3,6	-7,5±2,8	14,3	-27,3
	<b>2UR</b>	-15,2±1,4	-3,2±2,7	-9,3±1,3	12,0	-28,5
<b>3V4H</b>	<b>1DL</b>	-9,9±2,0	8,9±1,1	-0,5±1,3	18,9	-9,5
	<b>1UR</b>	-1,8±1,7	18,2±1,2	8,5±1,1	19,9	-30,6
	<b>2DL</b>	9,6±1,3	18,8±3,8	14,3±2,3	9,2	-22,5
	<b>2ML</b>	1,0±3,0	23,5±3,1	12,7±1,6	22,5	-18,4
	<b>2MR</b>	-18,1±1,5	5,8±4,1	-6,4±2,1	23,8	-25,5
	<b>2UR</b>	-18,6±1,0	-1,9±2,9	-10,5±1,5	16,8	-25,4
<b>4H3V</b>	<b>1DL</b>	-24,8±2,4	-10,6±1,7	-18,0±1,6	14,2	+5,7
	<b>1UR</b>	28,8±1,8	42,3±2,2	36,1±1,3	13,5	-5,5
	<b>2DL</b>	1,0±1,2	14,5±3,5	7,8±2,1	13,5	-27,0
	<b>2ML</b>	7,5±1,0	21,3±1,6	14,6±1,0	13,7	-22,1
	<b>2MR</b>	-17,1±3,4	3,8±2,4	-6,9±1,9	21,0	-24,4
	<b>2UR</b>	-16,2±1,4	1,5±1,9	-7,5±1,5	17,6	-27,5
<b>4H4V</b>	<b>1DL</b>	-22,9±3,0	-7,5±1,8	-15,5±2,0	15,4	+4,4
	<b>1UR</b>	25,2±1,8	34,5±3,9	30,0±2,2	9,3	-11,6
	<b>2DL</b>	1,4±1,9	16,1±2,0	8,9±1,0	14,7	-26,9
	<b>2ML</b>	13,2±0,5	28,5±1,7	21,2±1,1	15,3	-14,8
	<b>2MR</b>	-19,2±1,7	-6,1±2,8	-12,8±1,4	13,1	-24,1
	<b>2UR</b>	-17,7±1,5	-6,0±2,3	-12,0±1,3	11,6	-25,8
<b>4H5V</b>	<b>1DL</b>	-24,1±1,1	-8,7±1,6	-16,7±1,0	15,4	+3,7
	<b>1UR</b>	26,5±2,1	34,0±5,3	30,4±3,3	7,5	-10,8
	<b>2DL</b>	-0,1±1,1	15,2±1,7	7,7±1,2	15,3	-28,1
	<b>2ML</b>	15,4±1,4	25,9±1,6	20,9±0,9	10,5	-17,4
	<b>2MR</b>	-18,7±4,0	-6,4±2,7	-12,7±2,6	12,3	-22,3
	<b>2UR</b>	-15,4±3,8	-7,9±2,9	-11,7±2,3	7,5	-25,8

		Úhel 1 ± odchylka(°)	Úhel 2 ± odchylka (°)	Úhel osy ± odchylka (°)	Úhel rozevření (°)	Rozdíl od požadavku (°)
<b>4V3H</b>	<b>1DL</b>	-3,9±3,3	12,4±2,6	4,3±2,8	16,3	-14,3
	<b>1UR</b>	0,5±1,1	14,5±1,3	7,6±0,8	14,0	-34,2
	<b>2DL</b>	5,7±1,8	24,0±1,6	15,2±1,0	18,3	-19,4
	<b>2ML</b>	7,7±2,9	29,3±2,5	19,2±1,8	21,6	-13,2
	<b>2MR</b>	-19,6±4,6	1,2±5,2	-9,5±3,8	20,8	-20,8
	<b>2UR</b>	-21,9±1,7	-4,1±3,5	-13,4±2,2	17,8	-21,4
<b>4V4H</b>	<b>1DL</b>	-3,9±3,0	10,6±1,2	3,4±2,0	14,5	-14,7
	<b>1UR</b>	-2,8±2,0	14,2±1,2	5,8±1,3	17,0	-34,5
	<b>2DL</b>	8,0±1,9	24,9±1,7	16,8±1,5	16,8	-18,4
	<b>2ML</b>	5,7±2,5	29,6±2,0	18,4±1,7	23,9	-13,4
	<b>2MR</b>	-19,7±1,1	6,6±5,5	-6,9±2,6	26,3	-24,1
	<b>2UR</b>	-16,2±4,5	-2,4±2,8	-9,4±3,2	13,8	-24,3
<b>4V5H</b>	<b>1DL</b>	-8,6±1,3	8,1±1,0	-0,3±0,8	16,7	-11,6
	<b>1UR</b>	-4,0±1,0	13,9±0,9	5,1±0,8	18,0	-35,1
	<b>2DL</b>	10,7±2,7	26,2±1,7	18,8±1,7	15,5	-17,1
	<b>2ML</b>	4,4±1,8	28,4±2,8	17,2±2,0	24,0	-13,8
	<b>2MR</b>	-19,0±5,6	-0,6±4,1	-10,0±2,9	18,4	-20,4
	<b>2UR</b>	-21,1±1,7	-2,7±3,3	-12,2±2,0	18,4	-22,2
<b>5H4V</b>	<b>1DL</b>	-15,5±0,9	1,5±2,1	-7,2±1,1	17,0	-5,1
	<b>1UR</b>	32,3±2,2	45,7±2,0	39,5±0,8	13,3	-2,3
	<b>2DL</b>	0,6±2,4	10,3±4,3	5,4±1,8	9,7	-30,4
	<b>2ML</b>	13,6±1,4	28,7±1,9	21,5±1,3	15,0	-14,4
	<b>2MR</b>	-17,8±3,8	-4,4±1,8	-11,2±2,3	13,4	-23,4
	<b>2UR</b>	-14,6±2,4	-1,6±2,3	-8,2±1,4	13,0	-28,0
<b>5V4H</b>	<b>1DL</b>	-16,5±2,2	0,7±1,0	-8,1±1,4	17,3	-2,8
	<b>1UR</b>	-2,4±2,0	9,0±1,8	3,3±1,1	11,3	-39,2
	<b>2DL</b>	11,4±3,1	27,7±1,5	19,9±1,5	16,3	-15,8
	<b>2ML</b>	14,0±3,0	34,8±2,1	25,3±2,4	20,8	-8,1
	<b>2MR</b>	-25,0±1,7	-1,8±3,9	-14,0±1,5	23,2	-18,3
	<b>2UR</b>	-22,1±4,8	-11,2±3,9	-16,8±3,0	10,8	-18,1

## 7.4 Závislosti směřování na počtu lamel

Při paralelně vznikající diplomové práci P. Caletky byly změřeny následující varianty: 3H3V, 5H3V, 3H5V, 5H5V, 3V3H, 5V3H, 3V5H a 5V5H. Z těchto dat byly vytvořeny směrnice závislosti směřování na měnícím se počtu lamel.

Výsledky této práce přibližně korespondují se stanovenými směrnicemi. V některých případech, hlavně pak několik variant při směřování nahoru a dolů v pohledu 1DL a 1UR, leží úplně mimo předpokládané umístění. Jelikož tento rozdíl pozorujeme jen u některých pohledů, jedná se tedy o nahodilý jev a nelze mluvit o trendu, který změna počtu lamel způsobuje. Může se jednat o chybu způsobenou stupněm přesnosti této metody, kdy výsledek může ovlivnit například lokální vír, nebo vyšší jas snímků. [62] Dále se může jednat o chybu způsobenou například přílišným zatopením proudu a prostoru laboratoře kouřem a u některých souborů fotografií se při zpětném procházení ukázala příliš velká difference mezi směřování na snímcích v rámci měření jednoho pohledu. Tato difference může být způsobena nedostatečným ustálením proudu.

### 7.4.1 Zvyšující se počet horizontálních lamel u variant xHyV

Výsledky ukazují, že se zvyšujícím se počtem horizontálních lamel se zlepšuje proudění nahoru a dolů, až na odchýlení od trendu vyústky 4H3V, kde dojde ke zhoršení směřování. Tento efekt se vyskytuje výrazně u směřování nahoru a k lehkému zhoršení dojde i při směřování dolů. Na snímcích z těchto dvou měření se nachází velké množství kouře, které se zřejmě negativně podepsalo na vyhodnocení okrajů proudu, což způsobilo tuto chybu. Ke zhoršení dochází i u varianty 5H4V, kde se ale s největší pravděpodobností jedná o chybu měření, zřejmě v důsledku neustáleného proudu.

Dále dochází k lehkému zhoršení, a v některých případech pouze stagnaci směřování do stran, přičemž nedochází k žádnému výraznému odchýlení se od nastoleného trendu.

Rozdíl mezi vertikálním umístěním jednotlivých směrnic v grafu není příliš velký. Nárůst počtu vertikálních lamel přináší pouze drobné zlepšení směřování do stran, ale v případě směřování doleva do středu je varianta s pěti vertikálními lamelami výrazně horší než varianta se třemi nebo čtyřmi.

### 7.4.2 Zvyšující se počet horizontálních lamel u variant xVyH

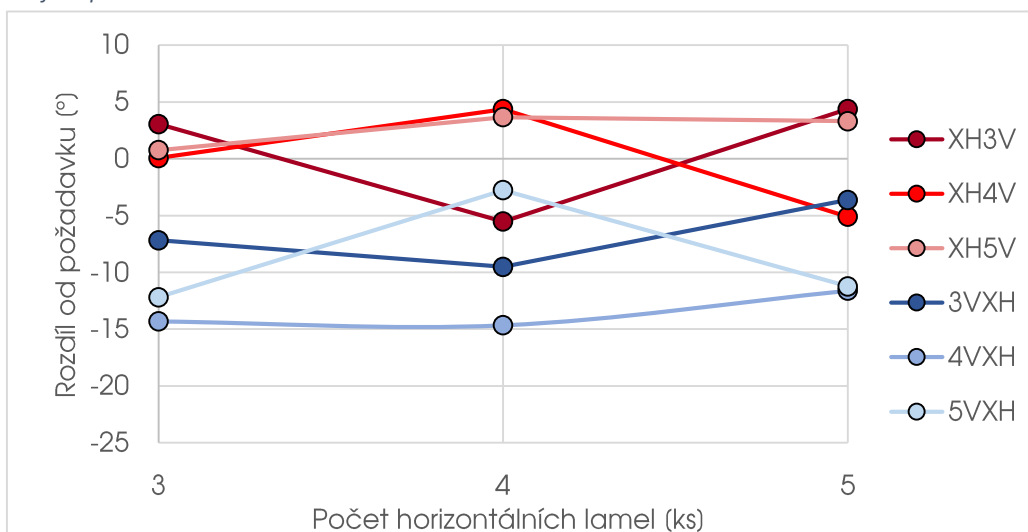
Mění se počet horizontálních lamel má pouze minimální vliv na směřování nahoru a dolů. Se zvyšujícím se počtem horizontálních lamel, umístěných vzadu, dochází k lehkému zlepšení, nebo pouze ke stagnaci ve směřování. To platí s výjimkou bodu vyústky 5V4H, kde dochází k výraznému odchýlení se od trendu, přičemž mezi jednotlivými snímky se nachází velký rozdíl ve směřování, chybu tedy způsobil zřejmě nedostatečně ustálený proud.

Zlepšení směřování do stran u variant xVyH lze nejlépe docílit zvýšením počtu vertikálních lamel vepředu. Se stoupajícím počtem horizontálních lamel pozorujeme lehké zlepšení ve směřování doleva, přičemž při jejich nastavení na střed pozorujeme u variant 3V4H a 5V4H odchýlení se od trendu a výrazný skok směrem k lepšímu směřování. Toto vychýlení je s velkou pravděpodobností způsobeno velkým množstvím rušivých proudů, vyskytujících se na snímcích. To že se jedná o chybu, také potvrzuje fakt, že tento trend nepozorujeme u varianty 4V4H, která se nachází přesně v očekávané oblasti.

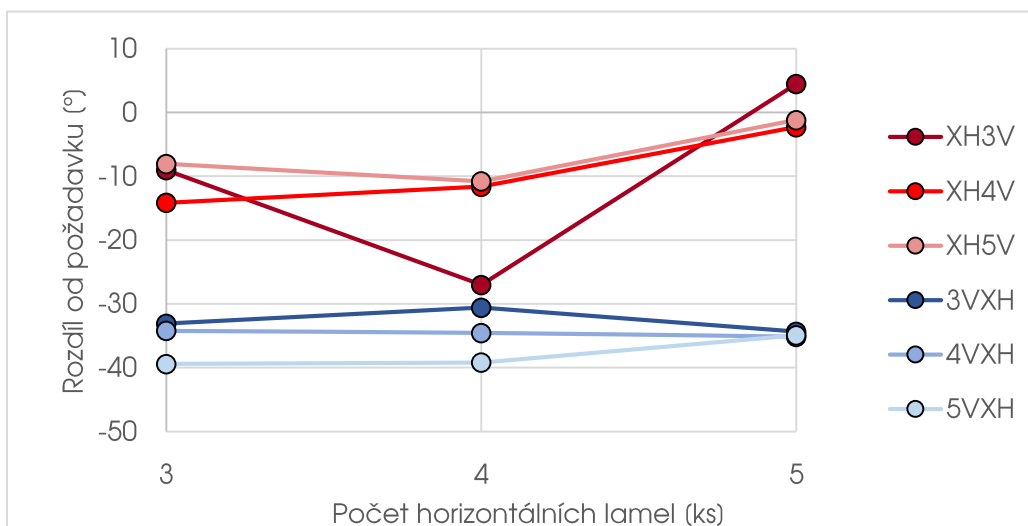
Dochází také k lehkému zhoršení směřování doprava, přičemž se výsledky až na malé odchýlení drží očekávaného trendu.

### 7.4.3 Grafy s výsledky

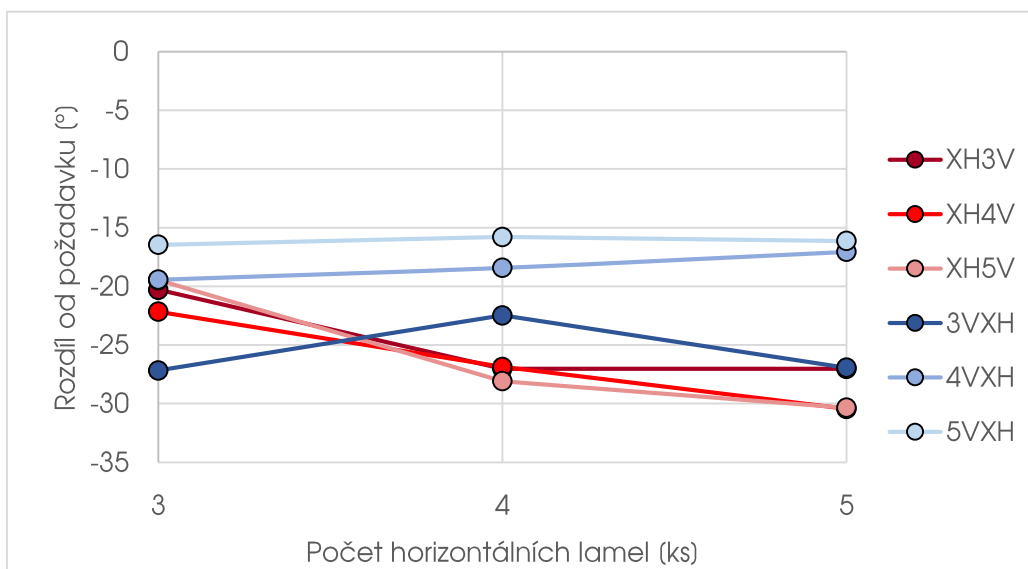
Graf 1 – pohled 1DL



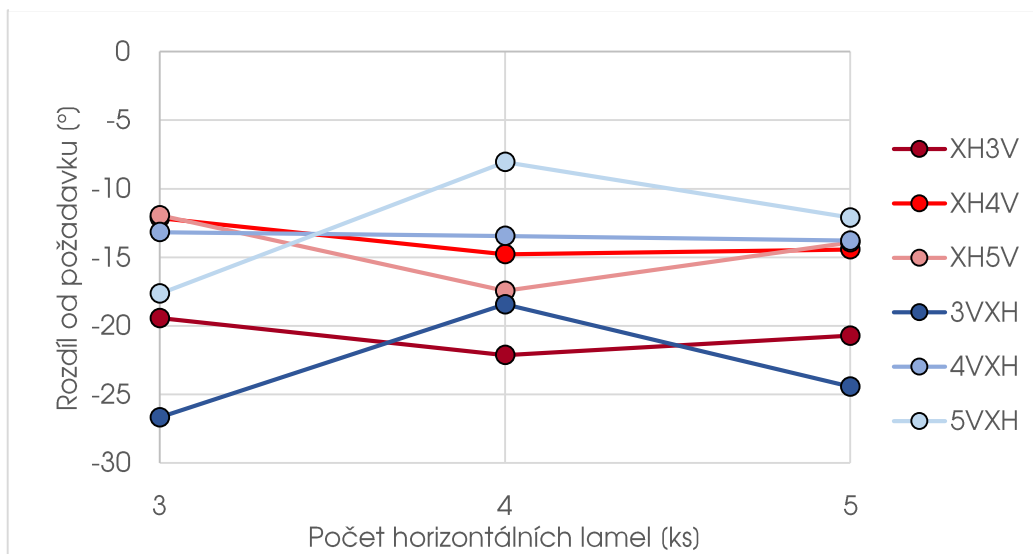
Graf 2 – pohled 1UR



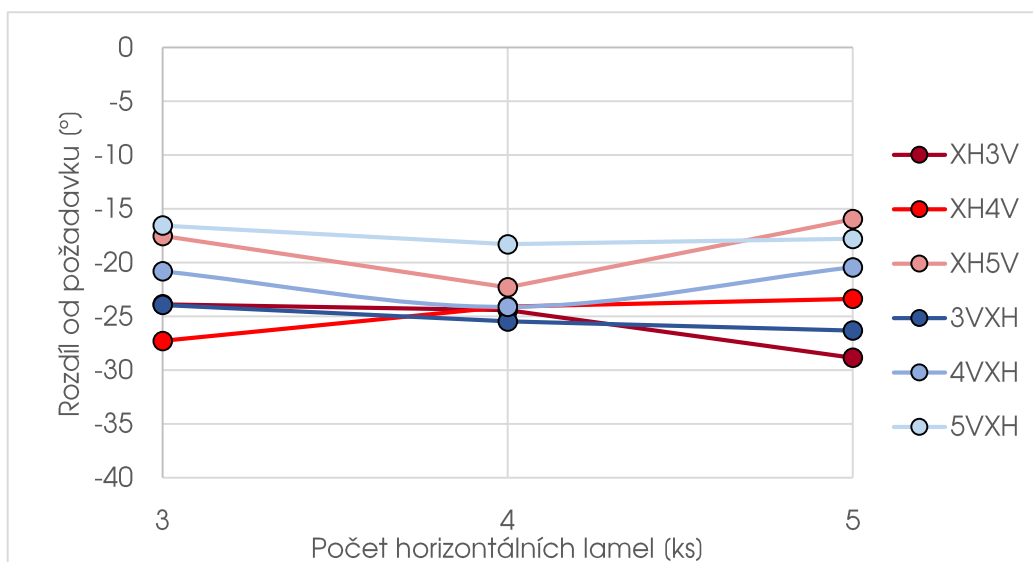
Graf 3 – pohled 2DL



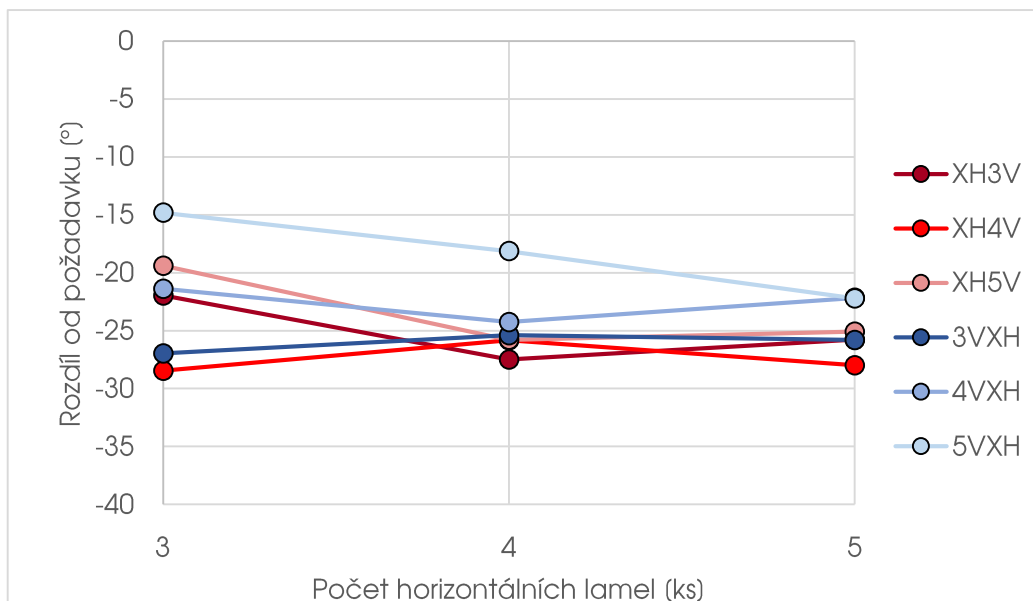
Graf 4 – pohled 2ML



Graf 5 – pohled 2MR



Graf 6 – pohled 2UR



## 8 Možné metody optimalizace

Zlepšení směřování a úhlu proudu by bylo možné docílit několika způsoby. Konkrétní metody optimalizace záleží na konkrétním požadavku pro aplikaci. Vlivy optimalizování pomocí změny pořadí lamel a změny počtu horizontálních či vertikálních lamel jsou popsány v předchozí kapitole. Zde je několik dalších možných způsobů optimalizace.

### 8.1 Změna tvaru

Kruhová vyústka při testování dosahuje lepších úhlů směřování, než vyústka hranatá. Při splnění požadavku na obdélníkový tvar vyústky, můžeme zlepšení docílit alespoň zaoblením vnitřních hran vyústky a přilehlého vzduchového kanálu. [19]

### 8.2 Profil lamel

Další možností je změna profilu lamel, směrem k co nejvíce aerodynamickému tvaru. Dojde tak ke zlepšení tvaru náběhové hrany, prodloužení a postupnému snížení odtokové hrany, čímž dojde k zamezení odtržení mezní vrstvy, která se trhá za odtokovou hranou a způsobuje tak vířivá proudění. [64, 65]

### 8.3 Poměr stran vyústky

Další možné vylepšení při směřování vyústek je posunutí první a druhé řady lamel více k sobě. Popřípadě může docházet i k pronikání předních a zadních lamel do sebe. Tímto jevem způsobíme, že proud mění svůj směr pouze v jednom kroku, což může vést k menším ztrátám. Dále vlivem odsazených zadních lamel může za těmito lamelami docházet k opětovnému narovnání proudu o opačnou stranu potrubí, než kterým směrem proud směřujeme. Tento jev lze pozorovat u vyústek typu xVyH, u kterých pozorujeme velmi špatné směřování nahoru a dolů a naopak u vyústek typu xHyV můžeme pozorovat horší směřování do stran. Směřování však není tak špatné, jako v případě směřování nahoru a dolů u vyústek, kde jsou horizontální lamely v druhé řadě. Negativní vlivy zde způsobuje obdélníkový profil potrubí, který má menší výšku, než šířku a proud směřující nahoru nebo dolů se od stěn odrazí dříve než proud směřující doleva nebo doprava.

Další možností pro rozšíření úhlu proudění v horizontální rovině je rozšíření ventilační vyústky, popřípadě pro rozšíření ve vertikální rovině její zvýšení. Tyto řešení jsou patrná i u větších aut střední třídy.

### 8.4 Zvětšení aktivní plochy

Pro účinnější ventilaci je také možné zvýšit plochu ventilačních vyústek napříč celým interiérem, což můžeme vidět na obrázku interiéru vozu Mercedes-Benz E-Klasse, který je také největším zde uváděným zástupcem vyšší střední třídy.



## Závěr

Práce pojednává o výzkumu proudění z ventilačních vyústek, primárně pak u osobních automobilů.

V první části jsou popisovány základní vlastnosti proudícího vzduchu podle teorie mechaniky tekutin. Toto rozdělení je aplikováno konkrétně na proud, vycházející z vyústky a je charakterizován jako turbulentní, izotermní, volný a zatopený.

V druhé části je popsáno rozmístění ventilačních vyústek a specifikován objekt zájmu experimentu, kterým je vyústka na pravé straně palubní desky. Jsou popsány funkce ventilačního systému, jako prvku nezbytného pro bezproblémový, bezpečný a komfortní provoz automobilu, jako je například distribuce čerstvého vzduchu, odmlžení či například tepelný komfort, související s pasivní bezpečností automobilu.

Další část práce je věnována řešerši způsobů testování ventilačních vyústek. A to jak z hlediska kvality směřování, tak z kvantitativního hlediska a také z pohledu ovlivnění tepelného komfortu. Popisuje se vliv počtu ventilačních vyústek, vliv tvaru a vliv počtu lamel na charakter proudu. Výzkum těchto vlivů je zkoumán převážně metodou zavádění látky do proudu, konkrétně pak kouřovou metodou a v případě zkoumání rychlostních polí v tomto proudění je použita metoda CTA, nebo například 3D sonda. Přínosné je také zkoumání vlastností proudění, za použití moderních metod, jako například použití metody PIV v automobilech, nebo ve velkých prostorech kabiny letadla, kdy získáme informace o tvaru proudění i o jeho vektorových polích. Výsledky těchto experimentů jsou dále využívány ve zdokonalování modelů CFD simulací těchto proudění, kterým můžeme proudění simulovat, například s cílem ventilaci zefektivnit. Následuje řešerše popisující různá řešení ventilačních vyústek napříč celou střední třídou osobních automobilů.

Experimentální části předchází seznámení se s měřicí tratí, geometrií experimentu, způsobem vyhodnocení dat a popis použitých přístrojů pro vizualizaci, zaznamenání dat, a programů, sloužících jak pro lepší ovládání, tak lepší opakovatelnost pokusů. Dále byly vymodelovány nové části ventilační vyústky pro testování čtyřlamelových variant, které byly následně vytištěny na 3D tiskárně.

Experiment byl proveden metodou vizualizace proudění pomocí kouře, prosvíceného laserovým nožem a obrazová data byla zaznamenána fotograficky. Již při provádění experimentu se projevíly charakteristické vlastnosti jednotlivých pořadí postavení horizontálních a vertikálních lamel.

Obrazová data byla vyhodnocena rozpoznáním obrazu, pomocí detekce okrajů kouře v paralelně probíhající bakalářské práci, k dalšímu zpracování do podoby, kterou lze vidět v tabulkách a grafech této práce.

Výsledky samotného experimentu poté ukázaly, že naměřená data přibližně korespondují s daty naměřenými v paralelně vznikající diplomové práci a potvrdily tak směrnice závislosti směřování na měnícím se počtu lamel.

Žádná z měřených vyústek však nedosahuje tak dobrého směřování, jako vyústka 5H3V, která se ukázala jako nejvhodnější kompromis jak v horizontálním, tak vertikálním směřování.

## Použité zdroje

- [1] LINHART, Jiří. *Mechanika tekutin I*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 978-80-7043-766-7.
- [2] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Mechanika tekutin*. Praha: SNTL, 1987.
- [3] CALETKA, P. Hodnocení funkčnosti větrací vyústky pro kabinu osobního vozu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 66 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [4] JANOTKOVÁ, E. TECHNIKA PROSTŘEDÍ - 1. část [online]. 2011 [citováno 20.5. 2016]. Dostupné z: <[http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/file/110\\_1\\_1/](http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/file/110_1_1/)>.
- [5] DUDLEY a System of Passenger Car Ventilation. *Proceedings of the American Philosophical Society* [online]. American Philosophical Society, 1904, **43**(176), 247-256 [cit. 2016-05-20]. ISSN 0003049X.
- [6] Finský trh: Škoda Octavia v červenci nejprodávanější. *Auto.cz* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/skoda-octavia-finsky-trh-v-cervenci-nejprodavanejsi-60844>
- [7] DALY, Steven. *Automotive air-conditioning and climate control systems*. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 978-075-0669-559.
- [8] Oxid uhličitý - utajený nepřítel. *TZB-Info* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/vnitni-prostredi/7132-oxid-uhlicity-utajeny-nepritel>
- [9] GLADYSZEWSKA-FIEDORUK, Katarzyna. Concentrations of carbon dioxide in a car. *Transportation Research Part D* [online]. Elsevier India Pvt Ltd, 2011, **16**(2), 166-171 [cit. 2016-05-20]. DOI: 10.1016/j.trd.2010.07.003. ISSN 1361-9209.
- [10] COLE, Jonathan, Martin PASSMORE a Eddie RICE. *The Effects of Outlet Geometry on Automotive Demister Performance* [online]. In: . s. - [cit. 2016-05-20]. DOI: 10.4271/2000-01-1277. Dostupné z: <http://papers.sae.org/2000-01-1277/>
- [11] HAPALA, Radim. *Větrání kabiny osobního automobilu – výzkum charakteru proudění z rozmrazovací mřížky předního skla a účinnost tohoto systému*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009.
- [12] KADER, M., Y. YOUN, Y. JUN a K. LEE. Characterization of the HVAC performance with defroster grillers and instrument panel registers. *International Journal of Automotive Technology* [online]. Heidelberg: The Korean Society of Automotive Engineers, 0906, **10**(3), 305-312 [cit. 2016-05-20]. DOI: 10.1007/s12239-009-0035-z. ISSN 1229-9138.
- [13] KOGLER, Mike, Younes CHLYEH a Ralph KRAUSS. New ventilation concept with indirect ventilation over the defrost outlet. *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* [online]. 2007, **109**(2), 154-160 [cit. 2016-05-20]. ISSN 0001-2785.
- [14] MUSAT, Radu; HELEREA, Elena. Parameters and models of the vehicle thermal comfort. *Acta Universitatis Sapientiae, Electrical and Mechanical Engineering*, 2009, 1: 215-226.
- [15] Nebezpečí únavy. *BESIP* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.ibesip.cz/cz/ridic/bezpecne-rizeni-vozidla/nebezpeci-unavy>
- [16] Používání klimatizace. *BESIP* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.ibesip.cz/cz/ridic/cestujeme-automobilem/pouzivani-klimatizace>
- [17] NASTASE, Ilinca. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL COMFORT WITH INNOVATIVE GRILLES IN a REAL SCALE ROOM. *Scientific Bulletin. Series, Mathematical Modeling in Civil Engineering* [online]. Bucharest: Technical University of Civil Engineering from Bucharest, 2011, (1/2), 214-223 [cit. 2016-05-20]. ISSN 1841-5555.
- [18] LEŽOVIČ, Tomáš. *Experimentální analýza proudu vzduchu z ofukovače osobního vozu s využitím žárového anemometru a návrh hodnocení kvality ofukovače*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011.
- [19] AHIRRAO, Amit K., et al. EFFECT OF VENT SHAPE ON THERMAL COMFORT OF PASSENGERS IN a CAR. *SASTech - TECHNICAL JOURNAL*. M. S. Ramaiah School of Advanced Studies, Bangalore, 2011, **2011**(10), 8. ISSN 2249 - 5924.

- [20] Mercedes B 2012: unikly první snímky interiéru nového Běčka. *Autoforum.cz* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/bleskovky/mercedes-b-2012-unikly-prvni-snimky-interieru-noveho-becka/>
- [21] Audi plotting a 235-mpg, "affordable" four-seat city car. *Autoblog.com* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.autoblog.com/2012/11/25/audi-plotting-a-235-mpg-affordable-four-seat-city-car/#slide-207335>
- [22] RUŽIC, Dragan. *Comparison of Different Air Vents Arrangements in a Tractor Cab Using the CFD Techniques* [online]. The Eighth International Symposium KOD 2014 Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, At Balatonfured, Hungary, 2014 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/263851108\\_Comparison\\_of\\_Different\\_Air\\_Vents\\_Arrangements\\_in\\_a\\_Tractor\\_Cab\\_Using\\_the\\_CFD\\_Techniques](https://www.researchgate.net/publication/263851108_Comparison_of_Different_Air_Vents_Arrangements_in_a_Tractor_Cab_Using_the_CFD_Techniques)
- [23] KRŠKA, L. Experimentální analýza proudu vzduchu z vyústky přístrojové desky osobního vozu s využitím kouřové metody a návrh hodnocení kvality vyústky. In. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011, s. 82.
- [24] LEŽOVIČ, Tomáš, František LÍZAL, Jan JEDELSKÝ a Miroslav JÍCHA. HVAC automotive vents evaluation and their performance. *HVAC&R Research* [online]. 2013, **19**(8), 1073-1082 [cit. 2016-05-20]. DOI: 10.1080/10789669.2013.824498. ISSN 1078-9669.
- [25] BEČICA, R. Vizualizace proudu z větrací vyústky pro přístrojovou desku osobního vozu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Lízal, Ph.D.
- [26] PECH, Ondrej, Jan JEDELSKY, Petr CALETKA a Miroslav JICHA. Visualization of the air flow behind the automotive benchmark vent. *EPJ Web of Conferences* [online]. EDP Sciences, 2015, **92** [cit. 2016-05-20]. DOI: 10.1051/epjconf/20159202062. ISSN 21016275.
- [27] PAVELEK, M., JANOTKOVÁ, E., ŠTĚTINA, J. Vizualizační a optické měřicí metody [online]. 2. [Brno]: Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, 2007 [citováno 20.5. 2016]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0000.htm>
- [28] LEE, Jin, Hak KIM a Sang LEE. Large-scale PIV measurements of ventilation flow inside the passenger compartment of a real car. *Journal of Visualization* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1112, **14**(4), 321-329 [cit. 2016-05-20]. DOI: 10.1007/s12650-011-0095-9. ISSN 1343-8875.
- [29] CAO, Xiaodong, Junjie LIU, Jingjing PEI, Yun ZHANG, Jiayu LI a Xueliang ZHU. 2D-PIV measurement of aircraft cabin air distribution with a high spatial resolution. *Building and Environment* [online]. Elsevier Ltd, 1412, **82**, 9-19 [cit. 2016-05-20]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.07.027. ISSN 0360-1323.
- [30] VAN HOOFF, T., B. BLOCKEN, T. DEFRAEYE, J. CARMELIET a G.J.F. VAN HEIJST. PIV measurements and analysis of transitional flow in a reduced-scale model: Ventilation by a free plane jet with Coanda effect. *Building and Environment* [online]. Elsevier Ltd, 1210, **56**, 301-313 [cit. 2016-05-20]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.03.020. ISSN 0360-1323.
- [31] CULLIMORE, Brent A.; HENDRICKS, Terry J. Design and transient simulation of vehicle air conditioning systems. In: *SAE CONFERENCE PROCEEDINGS P.* SAE; 1999, 2001. p. 15-24.
- [32] HERWIG, Heinz, Karsten KLEMP, Arnd SCHMÜCKER a Joachim CURRLE. Ventilation of passenger car cabins: comparison of experimental data and numerical calculations. *Forschung im Ingenieurwesen* [online]. 1996, **62**(6), 161-167 [cit. 2016-05-20]. DOI: 10.1007/BF02601418. ISSN 0015-7899. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF02601418>
- [33] KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování proudění tekutin, FLUENT, CFX* [online]. In: . Ostrava: VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2008 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>
- [34] MOSSAD, Ruth, William YANG a M. Phillip SCHWARZ. *NUMERICAL PREDICTION OF AIR FLOW IN a SHARP 90° ELBOW* [online]. Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, 2009 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: [http://www.cfd.com.au/cfd\\_conf09/PDFs/149MOS.pdf](http://www.cfd.com.au/cfd_conf09/PDFs/149MOS.pdf)
- [35] LIMAYE, Varad M., et al. Design of dynamic airvents and airflow analysis in a passenger car cabin. *SASTech-Technical Journal*, 2012, 11.1: 41-48.
- [36] Třídní boj: Jak se dělí auta do tříd. *Autorevue.cz* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.autorevue.cz/tridni-boj-jak-se-deli-auta-do-trid>

- [37] Design - ŠKODA Octavia Combi. *ŠKODA* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: [http://www.skoda-auto.cz/models/nova-octavia-combi/design#SliderModuleWebPart\\_2](http://www.skoda-auto.cz/models/nova-octavia-combi/design#SliderModuleWebPart_2)
- [38] Ford Focus v Ženevě nechýbí, ale premiéru měl už před týdnem. *Autorevue.cz* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.autorevue.cz/ford-focus-v-zeneve-nechybi-ale-premieru-mel-uz-pred-tydnem>
- [39] Audi A3 Sportback 2012: Fünftürer feiert Premiere. *Meinauto.de* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.meinauto.de/news/audi-a3-sportback-2012-fuenftuerer-feiert-premiere>
- [40] 2013 Mercedes-Benz A-Class: pricing and specifications. *Caradvice.com* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.caradvice.com.au/195634/2013-mercedes-benz-a-class-pricing-specifications/>
- [41] 2014 SEAT Leon SC - Interior. *Caricos.com* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: [http://www.caricos.com/cars/s/seat/2014\\_seat\\_leon\\_sc/1920x1080/56.html](http://www.caricos.com/cars/s/seat/2014_seat_leon_sc/1920x1080/56.html)
- [42] VOLVO V40 CROSS COUNTRY. *A.Charouz, spol s r.o.* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://volvocars.charouz.cz/modelova-rada/volvo-v40-cross-country/>
- [43] Oficiální fotografie nového Peugeotu 308. *Autosite.cz* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://autosite.cz/aktualita-769>
- [44] Volkswagen Golf VIII. *Autař.cz* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.autar.cz/clanky/no-vinky/volkswagen-golf-viii-78752.html>
- [45] First test of BMW series 1 2015: more honed and refined. *World Cars Blog* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.worldcarsblog.com/first-test-of-bmw-series-1-2015-more-honed-and-refined.html>
- [46] Nový Volkswagen Passat Variant již v prodeji. *Auto Enge* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <https://www.autoenge.cz/novy-volkswagen-passat-variant>
- [47] Audi představilo nové A4 včetně kombi A4 Avant. *DesignMagazin.cz* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.designmagazin.cz/technika/56361-audi-predstavilo-nove-a4-vcetne-kombi-a4-avant.html>
- [48] Facelift BMW 3 F30 oficiálně, detailně: tříválec je fakt, nové jsou i další motory. *Autoforum.cz* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/predstaveni/facelift-bmw-3-f30-oficialne-detailne-trivalec-je-fakt-nove-jsou-i-dalsi-motory/>
- [49] Ford Mondeo 2014 Test: der Spätstarter startet durch. *Meinauto.de* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.meinauto.de/testberichte/ford-mondeo-2014-test-der-spatstarter-startet-durch>
- [50] Mazda 6: třetí dimenze japonského sebevědomí. *Autorevue.cz* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.autorevue.cz/fotogalerie-nova-mazda-6-do-posledniho-detailu>
- [51] 2015 Opel Insignia 2.0-litre CDTI interior at the 2014 Paris Motor Show. *Indianautosblog.com* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://indianautosblog.com/2014/10/opel-new-2-0-litre-cdti-engine-zafira-tourer-insignia-paris-motor-show-151715/2015-opel-insignia-2-0-litre-cdti-interior-at-the-2014-paris-motor-show>
- [52] 2016 Mercedes-Benz C450 AMG 4Matic Review. *Automobilemag.com* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.automobilemag.com/news/2016-mercedes-benz-c450-amg-4matic-review/>
- [53] 2012 Audi A6 3.0T Quattro. *Car and Driver* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.caranddriver.com/reviews/2012-audi-a6-30t-quattro-test-reviews>
- [54] BMW řady 5 Touring: Design. *BMW.cz* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.bmw.cz/cs/all-models/5-series/touring/2013/design.html>
- [55] Mercedes-Benz třídy E: po střechu nadupaný plug-in hybrid. *Hybrid.cz* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/mercedes-benz-tridy-e-po-strechu-nadupany-plug-hybrid>
- [56] ĎURDINA, Lukáš. *Metody vizualizace proudění*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2010.
- [57] Spezialeffekte für Bühne, Film und Fernsehen. *SAFEX®* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: [http://www.safex.de/safex2/produkte.php?DOC\\_INST=4](http://www.safex.de/safex2/produkte.php?DOC_INST=4)
- [58] VÝVOJ VE FIRMĚ LAO - LASEROVÝ NŮŽ a LASER COMBINER. *LAO - lasery a optika* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/vyvoj-ve-firme-lao---laserovy-nuz-a-laser-combiner-55>
- [59] Crop factor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Crop\\_factor](https://en.wikipedia.org/wiki/Crop_factor)

- [60] Black Bodied Canon EOS 300D (Digital Rebel). *Digital Photography Review* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.dpreview.com/articles/3974370731/eos300dblack>
- [61] Recenze objektivu Canon EF 17-40mm f/4L USM: Základní informace. *Fotorádce.cz* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.fotoradce.cz/recenze-objektivu-canon-ef-17-40mm-f-4l-usm>
- [62] CALETKA, P. Posouzení funkčnosti různých modifikací větrací vyústky pro kabinu osobního vozu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. XY s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [63] CVRKAL, R. Vyhodnocení obrazů proudění z ventilační vyústky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. XY s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [64] ŠKORPÍK, Jiří. Základy aerodynamiky profilů lopatek a lopatkových mříží, *Transformační technologie*, 2009-10, [last updated 2016-03-04]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/zaklady-aerodynamiky-profilu-lopatek-a-lopatkovych-mrizi.html>.
- [65] JANALÍK, Jaroslav. *Obtékání a odpor těles* [online]. Ostrava: Ediční středisko VŠB - TU Ostrava, 2008 [cit. 2016-05-25]. ISBN 978-80-248-1911-2. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Obtekani.pdf>

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
$Re$	$[-]$	Reynoldsovo číslo
$w$	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost proudění
$D$	$[m]$	charakteristický průřez
$\vartheta$	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	kinematická viskozita
$Ar$	$[-]$	Archimedovo číslo
$\delta$	$[^\circ]$	úhel rozevření proudu
$\alpha_u$	$[^\circ]$	požadovaný úhel pro směřování nahoru
$\alpha_d$	$[^\circ]$	požadovaný úhel pro směřování dolů
$\alpha_l$	$[^\circ]$	požadovaný úhel pro směřování doleva
$\alpha_r$	$[^\circ]$	požadovaný úhel pro směřování doprava
$r$	$[^\circ]$	úhlový rozdíl v požadavku a skutečné hodnotě směřování
$\alpha_1$	$[^\circ]$	úhel na spodním okraji fotografie – úhel 1
$\alpha_2$	$[^\circ]$	úhel na horním okraji fotografie – úhel 2
$s$	$[^\circ]$	směrodatná odchylka v úhlu směřování